Р.М.Ивенс

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ЦВЕТА

Книга охватывает широкий круг вопросов, связанных с цветом источников света и различных отражающих и пропускающих свет материалов, основами цветового зрения и цветовыми восприятиями. Рассмотрены также вопросы классификации и измерений цвета и использования цвета в цветной фотографии и живописи.

Книга написана в популярной форме, без применения математического аппарата и в то же время весьма полно и на высоком научном уровне излагает современное состояние науки о цвете. В ней более 300 иллюстраций, из которых наиболее интересны 15 цветных вклеек, поясняющих ряд особенностей цветового восприятия.

Книга представляет большой интерес как для специалистов в области светотехники, колориметрии, физиологии зрения, живописи, фотографии, так и для широкого круга читателей, желающих подробно ознакомиться с наукой о цвете.

Редакция литературы по вопросам техники

Предисловие к русскому изданию

Восприятие цвета — одно из важнейших свойств органа зрения человека, позволяющее лучше ориентироваться в окружающем мире и познавать его закономерности.

Наука о цвете — цветоведение — охватывает широкий круг вопросов, включающих в себя существенные разделы физики, светотехники, физиологии, психологии, и тесно связана с эстетикой, искусством и рядом отраслей техники.

В предлагаемой читателям в русском переводе книге известного американского специалиста по колориметрии Р. М. Ивенса сделана попытка в популярной форме изложить проблему цвета во всей ее широте и многогранности.

Естественно, что в пределах одной книги оказалось невозможным охватить все вопросы цветоведения с одинаковой степенью полноты. Особенно если учесть, что автор, стремясь сделать книгу доступной возможно более широкому кругу читателей, совершенно не использует даже простейшего математического аппарата.

Уже в первой главе автор разделяет цветовые понятия на физические, психофизические и психологические и дает соответствующую таблицу терминов, рекомендованных Комитетом по колориметрии Американского оптического общества (см. табл. 1.1).

В связи с тем что обоснование целесообразности и правильности такой классификации цветовых понятий автор приводит лишь в последующих главах книги и не всегда достаточно убедительно, следует вкратце остановиться на этом вопросе.

Как известно, цветовые ощущения вызываются лучистой энергией, лежащей в относительно узком диапазоне световых излучений, соответствующих длинам волн порядка 0,4—0,75 *мкм*. Излучение может попадать в глаз наблюдателя непосредственно от источника света, видоизменяясь лишь за счет поглощения различными средами (воздух, вода, светофильтры и пр.), или после отражения от каких-либо объектов, находящихся в поле зрения.

Вопросы излучения света, распространения его в различных средах, а также изменения света при отражении, рассеянии и преломлении относятся к области физики, геометрической оптики и светотехники.

В повседневной жизни глазу человека редко приходится воспринимать излучение отдельных, изолированных длин волн (так называемые монохроматические), а объектом цветовых восприятий являются излучения, охватывающие достаточно широкие области видимого спектра. С точки зрения физики излучение, попадающее в глаз человека, может характеризоваться распределением его энергии в пределах видимого спектра. Различным спектральным составам воспринимаемого глазом излучения соответствуют качественно различные цветовые ощущения. В этом смысле мы привыкли ассоциировать слово «цвет» с определенными объективными свойствами наблюдаемых объектов. Так, например, определяя цвет моря как синий, а цвет розы как красный, мы тем самым предполагаем, что в первом случае в воспринимаемом излучении преобладает радиация коротковолновой части видимого спектра, а во втором — длинноволновой. Таким образом, в первом приближении цвет излучения может рассматриваться как некоторая упрощенная характеристика спектрального состава попадающего в глаз излучения.

Однако более детальный анализ показывает, что спектральный состав излучения и вызываемые им цветовые ощущения связаны между собой весьма сложной зависимостью, причем между ними отсутствует однозначное соответствие. Излучения совершенно различного спектрального состава, например равноэнергетическое, для которого интенсивность для всех длин волн постоянна, и излучение, полученное сложением в определенном соотношении желтого и синего монохроматических излучений, воспринимаются глазом как совершенно одинаковый ахроматический белый свет.

Таким образом, цветовые ощущения хотя и являются отражением спектрального состава попадающего в глаз излучения, однако качественно отличны от него и зависят от особенностей строения цветовоспринимающего аппарата глаза человека.

Согласно гипотезе о трехкомпонентности цветового зрения человека, в начальной форме высказанной еще Ломоносовым и развитой в дальнейшем Юнгом и Гельмгольцем, следует допустить существование в сетчатке глаза трех типов цветоощущающих приемников излучения с максимумами чувствительности в синей, зеленой и красной зонах спектра. Любые излучения, включая и монохроматические, обычно одновременно воздействуют на все три цветоощущающих приемника глаза, причем от уровня возбуждения этих приемников зависит воспринимаемый цвет излучения. Реакции этих приемников в виде определенных электрических импульсов после сложной и не вполне выясненной в настоящее время трансформации поступают в мозг и вызывают цветовые ощущения.

Равенство по цвету двух излучений, наблюдаемых в одинаковых условиях, обусловлено равенством реакций трех селективных приемников глаза. Таким образом, цвет излучения является сложной характеристикой и может быть выражен в виде трех чисел — координат цвета, определенным образом связанных с реакциями цветоощущающих приемников глаза.

Существование в сетчатке глаза именно трех приемников излучения в настоящее время не должно рассматриваться как гипотеза, а полностью доказывается тем экспериментальным фактом, что любое излучение может быть уравнено по цвету с суммой трех других определенным образом выбранных излучений. Эксперименты по так называемому сложению цветов позволили не только доказать трехкомпонентность цветового зрения, но и построить единую научно обоснованную систему классификации цвета, рекомендованную Международной комиссией по освещению (МКО) в 1931 г.

От координат цвета в системе МКО (обозначаемых x, y, z) легко перейти к системе координат, раздельно характеризующей количественную оценку цвета — яркость и качественную его оценку — цветность, определяемую доминирующей длиной волны и чистотой цвета.

С помощью изложенной выше системы оценки цвета излучения различных спектральных составов могут быть разбиты на группы, совпадающие по цвету. Данному цвету излучения теоретически соответствует бесконечно большое число возможных спектральных составов излучения. Многообразие цветов трехмерно и, следовательно, значительно меньше многообразия возможных кривых спектрального распределения энергии излучения. Цвет излучения, как всякая трехмерная величина, может быть изображен в виде вектора или точки в пространстве трех измерений.

Изложенная выше система оценки цвета излучения тремя числами в отличие от физической оценки называется автором (по нашему мнению, не совсем удачно) психофизической, что должно подчеркивать, что в ней определенным образом учтены особенности цветового зрения глаза человека.

Психофизическая система оценки цвета излучения позволяет решить вопросы классификации цветов, их сложения и рассчитывать цвет излучения сложного спектрального состава, однако координаты цвета не определяют полностью и однозначно вызываемые излучением цветовые ощущения и восприятия.

Цветовые ощущения существенным образом зависят от цвета фона, на котором наблюдается данный объект, времени наблюдения, цвета поверхности, наблюдавшейся ранее глазом, и многих других физических и психологических факторов. Понятия цвета как ощущения или восприятия значительно сложнее и шире, чем чисто психофизическая оценка цвета.

В приводимой автором классификации цветовые восприятия объединены в одном общем разделе — психология. Цветовые ощущения характеризуются светлотой, цветовым тоном и насыщенностью, которые определенным образом связаны с соответствующими психофизическими понятиями — яркостью, доминирующей длиной волны и чистотой цвета.

Поясним разницу между физическими, психофизическими и психологическими характеристиками излучения на примере световых восприятий. Предположим, что глаз наблюдает некоторую равномерно светящуюся поверхность. С физической точки зрения излучение этой поверхности по направлению к глазу наблюдателя полностью определяется ее спектральной энергетической яркостью. Суммирование этой величины для всех длин волн спектра излучения дает величину полной энергетической яркости поверхности. Соответствующая ей психофизическая величина — яркость — может быть получена суммированием энергетических яркостей отдельных монохроматических составляющих, умноженных для каждой длины волны на соответствующую функцию спектральной чувствительности глаза, так называемую кривую видности стандартного наблюдателя.

Можно считать, что при определении яркости глаз как бы заменяется некоторым идеальным приемником излучения с кривой спектральной чувствительности, соответствующей средней кривой видности. Такие приемники в виде фотоэлементов, снабженных светофильтрами, приводящими их спектральную чувствительность к соответствующей кривой глаза человека, действительно используются для целей световых измерений.

Соответствующая психологическая величина — светлота — должна как бы характеризовать ощущение яркости. Следует прежде всего указать, что светлота не пропорциональна яркости, а связана с ней в общем случае степенной зависимостью с показателем степени, определяемым уровнем яркости. В определенном диапазоне яркостей эта зависимость близка к логарифмической (закон Вебера — Фехнера). Однако светлота в определении автора зависит не только от величины яркости наблюдаемой поверхности, а также от яркости фона, на котором эта поверхность наблюдается, от состояния адаптации глаза наблюдателя, времени наблюдения и многих других факторов. Две поверхности совершенно одинаковой яркости и цветности могут восприниматься глазом как поверхности различной светлоты, если условия их наблюдения не одинаковы.

В первом приближении можно считать, что каждая из психологических характеристик цвета в основном определяется соответствующей ей психофизической характеристикой. Однако при более тщательном рассмотрении оказывается, что любая из характеристик цветового ощущения до некоторой степени зависит от всех

трех психофизических характеристик цвета. Так, например, светлота двух поверхностей одинаковой яркости, но различной цветности может оказаться неодинаковой даже при одинаковых условиях наблюдения. При изменении яркости и неизменном относительном спектральном составе излучения доминирующая длина волны и чистота цвета остаются, естественно, неизмененными, но ощущения цветового тона и насыщенности могут несколько измениться.

Можно, следовательно, прийти к заключению, что в то время как физика и психофизика цвета позволяют характеризовать его количественно, путем соответствующих расчетов или измерений, цветовые ощущения, зависящие от многочисленных и трудно учитываемых факторов, в настоящее время не поддаются количественной оценке. Строго оговорив условия наблюдения, мы можем, однако, находить совокупность цветов излучения, соответствующих постоянному значению одной из психологических характеристик. Так, например, можно определить экспериментально и изобразить графически совокупность цветов, дающих одинаковое ощущение цветового тона или светлоты цвета. Такая совокупность может быть также зафиксирована и в виде определенных материальных образцов—атласа цвета, в котором образцы сгруппированы по признакам равенства светлоты, цветового тона или насыщенности. Любая из шкал, например шкала светлоты или насыщенности, может быть разбита на участки, одинаково отличающиеся по восприятию друг от друга, причем для каждой ее ступени можно измерить соответствующие ей психофизические (колориметрические) характеристики.

Для количественной оценки цветовых ощущений может быть использован также так называемый метод порогов различения, при котором определяются минимальные вариации цвета, впервые замечаемые глазом. Использование пороговых данных позволяет, например, характеризовать светлоту поверхности числом порогов различения между черной поверхностью и данной, а насыщенность цвета — числом порогов различения между белым излучением и данным при определенном уровне светлоты.

Следует еще раз подчеркнуть, что все такие построения имеют смысл лишь при строгой фиксации условий наблюдения как в отношении наблюдаемого поля, так и состояния глаза наблюдателя.

Еще с бóльшими трудностями приходится сталкиваться, когда от простейших цветовых ощущений мы переходим к рассмотрению восприятия предмета как комплекса ощущений различных органов чувств, отражающих совокупность свойств предметов. При этом обнаруживается, что восприятие цвета зависит также от таких факторов, как рàзмер и форма предмета, расстояние наблюдения, фактура, характер отражения света и пр.

Человек в познании природы не ограничивается лишь тем, что он воспринимает непосредственно при помощи органов чувств, а дополняет свои ощущения мышлением, учитывающим весь его предшествующий опыт, благодаря чему чувственные восприятия обобщаются в форме определенных представлений.

Все изложенные выше особенности процесса возникновения цветовых ощущений и восприятий нашли в той или иной форме свое отражение в предлагаемой читателю книге.

Книгу условно можно разбить на четыре основных раздела. Первый раздел (гл. I—VI) посвящен физическим основам науки о цвете, источникам света, основам светотехники и свойствам цветных поверхностей в различных условиях освещения. Второй раздел (гл. VII—XI) включает в себя главы о строении и свойствах глаза человека и психологии цвета — световых и цветовых восприятиях. Третий раздел книги (гл. XII—XVI) посвящен вопросам психофизической оценки цвета — измерениям и спецификации цвета и цветовых различий, аддитивному и субтрактивному смешению цветов и влиянию освещения на цвет предметов. В последнем, четвертом, разделе книги (гл. XVII — XXI) изложены прикладные вопросы цветоведения: свойства красок и пигментов, применение цвета в фотографии и живописи и некоторые вопросы гармонии цветов.

К сожалению, план построения книги не полностью соответствует приведенной в первой главе классификации цветовых понятий. Вопросы цветовых восприятий излагаются автором раньше, чем вопросы измерения и спецификации цвета, что не может не затруднить их понимание.

Автору не удалось избежать некоторых повторений в изложении материала (например, вопросы классификации цвета, цветовой адаптации и др. затронуты в различных главах книги). Эти повторения в пределах возможного были исключены при редактировании книги.

Главы, посвященные физическим основам света, основам светотехники и цветовым расчетам и измерениям, написаны в предельно популярной форме. Как и во всей книге, автор не использует в этих главах даже простейших математических соотношений и не дает четких определений основных величин и единиц их измерения. Такая форма делает изложение доступным для широкого круга читателей, однако снижает интерес к этим разделам читателей с достаточной теоретической подготовкой. В главе, посвященной источникам света, отсутствует описание некоторых разработанных в последнее время источников: ртутно-кварцевых ламп с исправленной цветопередачей, ксеноновых ламп, новых типов люминесцентных ламп и пр.

Вопросы колориметрии изложены автором весьма неполно и поверхностно. В частности, совершенно отсутствует описание сов-

ременных фотоэлектрических приборов для спектральных и цветовых измерений, интеграторов цвета и пр.

Излагая основы цветового зрения, автор не приводит современных теорий цветового зрения. В книге отсутствуют также многие из предложенных систем оценки цвета, в которых сделаны попытки связать цветовые восприятия с колориметрической оценкой цвета. В книге также слабо отражен важный вопрос о методах оценки качества цветопередачи источников света.

Наиболее интересными и в то же время наиболее сложными для понимания являются главы книги, связанные с иллюзиями зрения и со световыми и цветовыми восприятиями. Автор трактует вопросы цветовых ощущений и восприятий во всей их полноте, без каких-либо упрощений. Подробно анализируется зависимость цветовых восприятий от таких факторов, как цвет фона, условия освещения, фактура поверхности, особенности наблюдения и пр. Наглядно показано влияние на цветовое восприятие явлений одновременного и последовательного цветового контраста, константности цвета, цветовой адаптации и др.

Автор пытается объяснить ряд явлений цветового зрения, в том числе одновременный и последовательный контраст и др., исходя из цветовой адаптации. При этом процесс адаптации он трактует упрощенно, как изменение чувствительности трех селективных приемников глаза. Следует указать, что эти явления не могут быть полностью сведены к адаптационным, а в самом процессе цветовой адаптации важную роль играют, помимо процессов, происходящих в сетчатке, ряд чисто психологических факторов.

Много нового и интересного читатель найдет в последних главах книги, посвященных применению цветоведения в фотографии и искусстве.

Автор, разбирая вопросы цветовых восприятий, роли цвета в искусстве и вопросы цветовой гармонии, в основном стоит на объективных научных позициях, близких к материалистическим. Однако в своем изложении он не всегда последователен и в отдельных его высказываниях проявляется влияние концепций современной идеалистической философии и буржуазного искусства. В связи с этим мы были вынуждены снабдить текст рядом оговорок и уточнений, а отдельные разделы книги дать в сокращенном переводе.

Нельзя сказать, чтобы замысел автора о создании всеобъемлющей книги по цветоведению удался ему полностью. Тем не менее книга содержит много нового фактического материала, изложение основ цветоведения ведется автором с использованием большого количества практических примеров и с привлечением богатого иллюстративного материала в виде таблиц и графиков, а также цветных вклеек. Поэтому книга Р. Ивенса может быть с полным основанием рекомендована читателям как введение в науку о цвете, необходимое

для дальнейшего изучения специальной литературы, посвященной отдельным проблемам цветоведения.

Следует указать, что автор совершенно не учитывает работы советских колориметристов, внесших много нового в науку о цвете. Основные книги по колориметрии, изданные в Советском Союзе, а также зарубежные издания, не вошедшие в приводимую автором библиографию, помещены в конце книги в виде списка дополнительной литературы. В процессе редактирования книги нами сделан ряд примечаний, частично разъясняющих текст, а частично содержащих ссылки на исследования, не упомянутые автором.

В переводе книги принимали участие Н. А. Аваткова, С. Д. Грудская, С. А. Друккер, И. С. Файнберг, В. С. Хазанов, Л. С. Шелков и К. Р. Янсон.

С. С. Алексеев взял на себя труд по рецензированию книги и просмотрел некоторые главы перевода, сделав ряд ценных замечаний.

Д. А. Шкловер

Предисловие автора

Наука о цвете интересует широкий круг читателей столь различных специальностей, что очень трудно написать книгу, которая была бы полезна для всех. Прежде всего значительные трудности возникают при выборе строгой и в то же время общепонятной терминологии. В настоящей книге слова используются преимущественно в их значении, применяемом в обычной разговорной речи, при минимальном числе новых определений и терминов. Вторая трудность заключалась в том, что при достаточно полном изложении основ науки о цвете необходимо было опираться на весьма большое число других связанных с ней областей науки и искусства. Цветоведение охватывает в основном три большие области науки — физику, психофизику и психологию. До настоящего времени не было монографий, в которых читатели имели бы возможность ознакомиться со всеми тремя указанными выше разделами науки о цвете одновременно. Настоящая книга написана с целью восполнить этот пробел. Каждое из этих трех направлений получило в книге самостоятельное развитие, и все они рассмотрены во взаимосвязи в конце книги. Мы надеемся, что принятый нами метод изложения, даже если он делает отдельные части книги менее интересными, даст возможность изучающим ее независимо от подготовки познакомиться с некоторыми новыми сторонами науки о цвете, которые им были ранее неизвестны.

Задача автора состояла в том, чтобы написать книгу таким образом, чтобы любой внимательный читатель мог освоить основы науки о цвете. Именно с этой целью, а не только для облегчения изложения, в книге приведено большое количество иллюстраций, снабженных подчас подробными пояснениями. За исключением нескольких последних глав, в графиках по возможности просто отражены основные проблемы цветоведения и свойства света и цвета, которые излагаются в данном разделе текста. В связи с этим графики следует рассматривать одновременно с другим иллюстративным материалом.

Наконец, имеется трудность, которая иногда кажется непреодолимой, заключающаяся в том, что текст книги носит, насколько это возможно, целиком описательный характер практически без

использования каких-либо математических соотношений. Хотя в связи с этим некоторые положения книги могут показаться недостаточно обоснованными, мы надеемся, что возможность ее изучения читателями, не знакомыми с точными науками, вполне компенсирует этот недостаток.

Наука о цвете затрагивает в какой-то степени всех людей независимо от их специальности. К сожалению, изложение основ науки о цвете невозможно упростить, не представив ее односторонне. В данной книге сделана попытка изложить цветоведение по возможности полно, без каких-либо упрощений.

Почти все приведенные в книге положения просты и непосредственны. В общей науке о цвете некоторые из этих простых идей объединяются в весьма сложные комплексы. Автор не пытался упростить эти случаи, так как именно в них и заключается сущность науки о цвете. Автор готов нести полную ответственность за способ и последовательность изложения основных положений книги.

Наряду с идеями различных исследователей, приводимыми большей частью без ссылок на первоисточники, в книге изложена также точка зрения самого автора. Автор надеется, что изложение принципов, использовавшихся им самим в течение 20 лет творческой работы в области цвета и цветной фотографии, будет также полезно другим, как было полезно ему самому в начале работы.

Книга создавалась постепенно в течение ряда лет, и автор выражает свою признательность многим лицам, с которыми он имел возможность обсуждать различные стороны науки о цвете.

Ральф М. Ивенс

ГЛАВА I

Цвет и свет

Цвет и форма — основные признаки, характеризующие наблюдаемый предмет и обусловливающие его индивидуальность. Из этих двух признаков для правильного опознавания предмета цвет обычно менее важен. Однако он является одной из основных качественных характеристик объекта. Цвет редко оценивается как самостоятельный фактор, и ему обычно отводится вспомогательная роль. Он придает свое очарование, свою индивидуальность форме, совместно с которой он зрительно воспринимается. Однако, если рассматривать цвет в отрыве от формы, эти особенности могут исчезнуть. В этом и только в этом цвета аналогичны отдельным звукам в музыке. Звучание отдельной ноты нельзя сравнить по красоте со звучанием той же ноты в аккорде, являющемся частью музыкального произведения. Точно так же цвет вносит свой вклад в общий вид объекта. Один и тот же цвет в зависимости от обстоятельств может быть приятным или неприятным, привлекательным или отталкивающим, «благородным» или «кричащим». Некоторые из привычных значений слова «цвет» отражают его способность характеризовать наблюдаемый объект или обстановку. Примером использования цветовой терминологии могут служить такие выражения, как «колоритная личность» или «тоска зеленая».

Любая попытка дать удовлетворительное определение слову «цвет» обязательно связана со всеми сложностями зрительного восприятия. Рассмотрение различных значений, которые может иметь это слово, составляет по существу предмет исследования данной книги. Однако, прежде чем перейти к существу вопроса, необходимо уяснить себе всю его многогранность. Лишь за последние годы достаточно ясно определилась роль различных факторов, влияющих на преобразование лучистой энергии в ощущение цвета, т. е. в качество, связанное с восприятием. Естественно, что в повседневной жизни словом «цвет» определяют многие звенья длинной цепи понятий, в результате чего в настоящее время его применения столь разнообразны, что оно потеряло точное значение. С другой стороны, при попытке обобщить все значения этого слова обнаруживается, что оно является почти синонимом слова «свет».

Например, бывают такие сложные случаи, когда лучистая энергия источника света изменяется при отражении от отдельных

предметов, попадает в глаз и воспринимается нами как свойство этих предметов. В подобных случаях мы говорим о цвете источника, цвете объекта и о воспринимаемом цвете. Мы, безусловно, правы, говоря, что свет от «белого» источника проходит через «желтое» прозрачное вещество, падает на пурпурный объект и зрительно воспринимается как «красный» цвет. Столь же разумно высказывание о том, что, например, «желтый» монохроматический свет в некоторых случаях зрительно воспринимается как «зеленый». Эти названия цветов относятся к различным аспектам обсуждаемого вопроса и связаны со зрительным восприятием в различных условиях. Проблема цвета чрезвычайно сложна, и, чтобы в ней разобраться, необходимо провести тщательные исследования.

В настоящее время проводится большая работа по подготовке точной терминологии по цветоведению. Необходимость в такой терминологии очевидна. Для того чтобы можно было точно сослаться на ту или иную фазу цветового восприятия, необходимо пользоваться конкретными терминами. Вопросы цветовой терминологии рассмотрены в докладе Комитета по колориметрии Американского оптического общества («The Optical Society of America»), представленном в 1944 г.[1] В этом докладе делается попытка разрешения задачи, исходя из трех основных аспектов, для каждого из которых дается точная терминология. Чтобы понять необходимость такой всеобъемлющей классификации, следует предварительно ознакомиться с процессом зрительного восприятия.

Глаз — это один из органов чувств человека. Так же, как мы ощущаем давление (через прикосновение), температуру (чувствуя тепло или холод), мы ощущаем определенные виды лучистой энергии, называемой светом. Излучение источника света, попадая в глаз, вызывает определенную реакцию мозга, в результате чего мы говорим, что видим свет. Свет, отраженный от объекта, отличается от света, попадающего в глаз непосредственно от источника, как качественно, так и количественно.

К сожалению, нет двух людей, которые воспринимали бы свет абсолютно одинаково; более того, никто ничего не может сказать о природе изображений, возникающих у другого. Итак, наука о зрительном восприятии делится на три основных раздела, которые в свою очередь распадаются на множество подразделов. Прежде всего следует сказать о *физике* источника света и тех объектов и веществ, которые могут изменить свет этого источника; затем — о чувствительности самого глаза, измеренной в определенных условиях методами, которые будут рассмотрены ниже. Большое коли-

[1] Разработка цветовой терминологии ведется в ряде стран уже давно. Терминология по колориметрии, рекомендованная в СССР, приведена в сб. «Терминология светотехники», Изд-во АН СССР, 1957.— *Прим. ред.*

чество таких измерений, проведенных с привлечением значительного числа наблюдателей, позволило вывести средние данные о цветовой чувствительности глаза и ввести понятие о «среднем наблюдателе». Свет, излучаемый источником или отраженный от объекта, может быть оценен применительно к этому среднему наблюдателю. Подобная оценка известна под названием *психофизической оценки света* [1]. Однако она совсем не отражает процесс умственного восприятия и тот факт, что излучаемая энергия одного и того же качества не всегда одинаково воспринимается даже одним человеком. Попросту говоря, один и тот же свет не всегда зрительно воспринимается одинаково окрашенным. В связи с этим третий раздел назван *психологией*, чтобы подчеркнуть его отличие от элементарного психофизического процесса.

В книге мы постараемся по мере возможности придерживаться общепринятой терминологии. Это не означает, однако, что автор против систематизации существующих терминов, наоборот, мы считаем, что любые понятия на определенной, достаточно высокой стадии разработки должны быть систематизированы. Эта книга должна облегчить создание такой идеальной классификации в будущем.

Восприятие

Затруднения в понимании слова «цвет» частично связаны с тем, что один и тот же объект может зрительно восприниматься по-разному. Процесс зрительного восприятия — это комбинация двух основных факторов, которые можно выразить следующими словами: «что́ мы видим в действительности» и «что́ нам кажется, что́ мы видим». Каково бы ни было научное объяснение этому процессу, тщательный анализ любой зрительной ситуации часто обнаруживает, что «при повторном наблюдении она выглядит иначе». Часто вполне очевидны два и более способов видения, так что можно произвольно переходить от одного к другому. Например, я пишу, сидя на террасе дома, расположенного на морском берегу: передо мной окно, в котором отражаются залитые светом морская вода и берег; за окном ваза с оранжевыми ноготками. При первом взгляде на окно не видно ничего, кроме отражения берега и воды. Если посмотреть внимательнее, то будут видны за окном ноготки. При тщательном анализе результатов наблюдения обнаруживаются три возможности видения: две — наиболее простые и обычные, третья — весьма затруднительная, но все же вероятная. Если внимание целиком обращено на ландшафт, то цветы почти не заметны,

[1] Такой оценке (полученной при более ясно оговоренных условиях) Комитет по колориметрии дает название «цвет», и в предложенной им системе это единственное значение, которое может иметь само это слово.

635

и, наоборот, если внимание привлечено цветами, мы почти не будем замечать отражения ландшафта. Поскольку мы уже увидели цветы, то какой-то след от их изображения обязательно наложится на изображение моря, и насколько сильно одно изображение будет налагаться на другое, будет зависеть от степени внимания к обоим объектам.

Третий способ наблюдения, очень трудно осуществимый, приводит к удивительному результату. Если внимание полностью привлечено поверхностью окна, которую мы пытаемся увидеть как окрашенное стекло, то на мгновенье может показаться, что оранжевый цвет ноготков и сине-зеленый цвет моря в значительной степени нейтрализуют друг друга и воспринимаются почти серыми. Таким образом, цвет зрительно воспринимаемого изображения зависит от того, на какой участок объекта направлено внимание наблюдателя, и от намерения наблюдателя увидеть тот или иной участок объекта. Если бы художник попытался изобразить описанное нами окно, ему пришлось бы выбрать какую-либо одну определенную стадию наложения одного изображения на другое и отразить это на картине. По причинам, которые обычно для каждого объекта различны, картина может отражать только одну форму сочетания изображений и никак не все три сразу. В нашем примере зрение фокусируется на три различных расстояния для трех объектов: цветы, окно и море, причем яснее воспринимается цвет объектов, находящихся в более резком фокусе.

Более детально вопрос о цветовом восприятии будет рассмотрен в отдельной главе. Здесь мы коснулись его лишь для того, чтобы несколько разъяснить слово «восприятие». Это слово используется в психологии для определения различия между тем, что́ наблюдатель *видит*, и тем, что́ он *должен* был бы видеть, исходя из знания природы попадающего в глаз света, т. е. понятие «восприятие» относится к действительному изображению, сформированному в нашем мозгу, а не к изображению, образованному глазом. «Воспринимать»— это значит «видеть» в том смысле, в каком обычно употребляется этот глагол.

При изучении цвета необходимо различать восприятие как деятельность мозга и как работу глаза, основанную на чисто физических законах. Путаница здесь не только затрудняет понимание вопроса, но и может привести к ошибкам при воспроизведении того или иного объекта на фотографии или картине.

При фотографировании на цветную пленку фотограф имеет дело со светом, отраженным от объекта; однако восприятие изображения обычно происходит в условиях освещения, отличных от условий фотографирования. Художник, если он ставит своей целью отражение действительности, имеет дело с *воспринимаемым* объектом; здесь опять условия зрительного восприятия картины отличаются

от условий восприятия действительности. Отсюда следует, что затронутый вопрос чрезвычайно сложен, и мы постараемся рассмотреть его всесторонне, вначале несколько элементарно, а в заключительных главах более обстоятельно. Вопрос о цветовых восприятиях будет рассмотрен с физической, психофизической и психологической точек зрения.

Восприятие с физической точки зрения

Свойства и характерные особенности света, попадающего в глаз, могут быть определены и выражены в величинах, не имеющих прямого отношения к глазу. Эти измерения и понятия находятся целиком в сфере физики и определяются методами, для которых не имеет значения, виден свет или нет. Физик может точно установить, что два луча света идентичны или что они определенным образом отличаются друг от друга. Однако он не может, не выходя за рамки чистой физики, установить, как эти два луча будут выглядеть. Таким образом, физик определяет качество света, как таковое, не прибегая к помощи наблюдателя.

Восприятие с психофизической точки зрения

Очевидно, если бы мы достаточно знали о механизме зрения и ограничились только простыми ситуациями, можно было бы точно рассчитать по известным физическим свойствам данного светового луча, каким образом этот луч будет зрительно восприниматься наблюдателем. Научное исследование реакции зрительного механизма в данных конкретных условиях — это область психофизики. Несмотря на то что этот вопрос за последние годы широко исследовался, остается еще очень много неясного. Приблизительная оценка внешнего вида объекта может быть произведена сравнительно легко и с достаточной надежностью общедоступными методами. Однако в настоящее время с достаточной точностью может быть выполнен только один тип расчетов. Это так называемый цветовой подбор для стандартного наблюдателя. Можно относительно просто определить, будут ли два луча света выглядеть *одинаковыми* для наблюдателя, обладающего определенным, «средним нормальным» зрением. Если же они кажутся наблюдателю различными, то мы не сможем рассчитать эту разницу только по известным характеристикам цветового зрения.

Следовательно, в настоящее время психофизика ограничена оценкой световых лучей по отношению к данным стандартного наблю-

дателя, полученным в нормальных условиях. Со временем по мере увеличения наших знаний мы, вероятно, сможем определять внешний вид наблюдаемых предметов с большей точностью.

Восприятие с психологической точки зрения

За пределами области психофизики находится область психологии, охватывающая вопросы, связанные с разнообразными возможностями влияния света на сознание. Мы можем дать следующее определение этому разделу: психология цвета—это исследование зависимости между цветом, рассчитанным для стандартного наблюдателя, и цветом, воспринимаемым в действительности. Это определение учитывает внимание, отношение наблюдателя к воспринимаемому объекту и его ощущение, т. е. те факторы, которые исключаются при психофизических расчетах. По существу это определение включает в себя те влияния, которые оказывают на восприятие условия наблюдения, не учитывающиеся в том случае, когда глаз рассматривается как некоторый идеальный приемник. Граница между этими двумя видами оценки несколько неясна. Может показаться, что оба вида полностью входят либо в психологию, либо в психофизику в зависимости от наклонностей исследователя. Однако такую границу легко провести, так как она соответствует моменту, когда необходимо учитывать *намеренное внимание* наблюдателя. Когда наблюдатель обнаруживает, что его реакция изменяется под влиянием его отношения к восприятию, психофизические расчеты становятся невозможными.

Наряду с изучением цвета как свойства объекта, воспринимаемого человеком, могут быть рассмотрены многие другие интересные вопросы: роль цвета в жизни индивидуума, физиологические и философские основы цветовых ощущений, природа и причины восприятия вообще и т. п. Все эти вопросы лишь вскользь затрагиваются в нашей книге. Только последняя глава частично посвящена эстетическим свойствам цвета и цветовой гармонии.

Многое из того, что написано по вопросу о цвете, не имеет большой практической ценности в основном потому, что у авторов работ нет отчетливого представления о предмете во всей его полноте, и, следовательно, они не могут всесторонне рассматривать то или иное явление, связанное с цветом. Мы попытаемся всесторонне рассмотреть проблему цвета, не затрагивая сложных философских вопросов.

Таблица 1.1

Терминология Комитета по колориметрии Американского оптического общества[1])

Физика	Психофизика	Психология	
Зрительный стимул	Свет	Зрительное ощущение	Зрительное восприятие
Лучистая энергия Спектральный состав	Световая энергия Цвет	Цветовое ощущение	
Характеристики лучистой энергии	Характеристики света и цвета	Характеристики цветового ощущения	Факторы внешнего вида, определяющие восприятие
Лучистый поток а. Энергетическая яркость б. Облученность в. Лучистая отражательная способность г. Лучистая пропускательная способность	1. Световой поток а. Яркость б. Освещенность в. Световая отражательная способность г. Световая пропускательная способность	1. Светлота	Апертура (1—5) Источник света (1—8) Освещенность (1—3) Характеристики объекта: Поверхность (1—11) Объем (1—9)
Спектральное распределение (Относительный спектральный состав, качество)	Цветность 2. Доминирующая (или дополнительная) длина волны 3. Чистота цвета	Ощущение цветности 2. Цветовой тон 3. Насыщенность	Характеристики внешнего вида 1. Светлота 2. Цветовой тон 3. Насыщенность 4. Размер 5. Форма 6. Расположение 7. Мелькание 8. Сверкание 9. Прозрачность 10. Глянец 11. Блеск

[1]) *J. of the Opt. Soc. of America*, **V**, 33, 552 (1943).

Терминология Американского оптического общества

С целью использования в последующих главах и показа внутренней связи различных факторов мы приводим таблицу терминов [1], которая была опубликована в докладе оптического общества Америки. Одна из целей нашей книги состоит в том, чтобы помочь читателю, впервые столкнувшемуся с вопросами цвета, понять необходимость и разумность такой сложной системы.

---

[1] Более подробно терминология, приведенная в табл. 1.1, разбирается автором в последующих главах книги. Некоторые обоснования этой терминологии изложены в книге «The Science of Color», N. Y., 1953.— *Прим. ред.*

ГЛАВА II

Физическая природа света

Без достаточно полного знания физики трудно понять физическую природу света. Необходимо, в частности, иметь некоторое представление о значении слова «энергия». Однако для практических целей нет надобности, чтобы представление было очень ясным; важнее знать не истинную природу света, а его свойства, которые можно охарактеризовать по аналогии с другими, более знакомыми явлениями.

Существует много форм энергии, каждая из которых способна привести к возникновению определенной силы или превратиться в другой вид энергии. Бейсбольный мяч, находясь в воздухе, обладает энергией, сообщенной ему силой, с которой его бросили. Эта энергия расходуется при ударе мяча о другой предмет, например перчатки бейсболиста или оконное стекло. Электричество также есть форма энергии. Оно может быть превращено в тепло, если протекает через проволоку, имеющую достаточное сопротивление, т. е. превращается в другую форму энергии. Оно превращается в механическую силу, когда его используют, например, для вращения мотора.

Излучение

Свет является одной из форм так называемой электромагнитной энергии. Он распространяется в пространстве, не испытывая сопротивления, и, как многие другие формы энергии, не может быть обнаружен до тех пор, пока не встретит на своем пути какой-либо предмет или, претерпев иные изменения, не превратится в другой вид энергии. Мы видим свет только потому, что он действует на сетчатку нашего глаза, и предметы мы видим только благодаря тому, что достигающий их свет видоизменяется и это видоизменение воспринимается глазом. Однако глаз не является единственным прибором, с помощью которого может быть обнаружена или «воспринята» световая энергия. Хорошо известны и другие «приемники», например фотоэлементы, превращающие свет в электрическую энергию, которую затем можно измерить.

Для существования света необходимо прежде всего, чтобы была создана и послана в пространство электромагнитная энергия.

Точка, в которой создается эта энергия, называется *источником энергии*, а предмет, излучающий свет,— *источником света*. Будучи создан, свет от источника распространяется с постоянной скоростью во всех направлениях до тех пор, пока не встретит на своем пути какой-либо предмет. Процесс распространения света от источника называется *излучением*, а сам свет часто называют *лучистой энергией*.

Важно ясно понимать выражение «во всех направлениях от источника». Если маленький источник излучает свет в свободное пространство, то справедливы следующие положения. В этом пространстве не может быть точки, через которую непрерывно (как показывают обычные измерения) не проходил бы свет с постоянной скоростью. Во всех точках поток энергии направлен от источника по прямой, соединяющей источник с рассматриваемой точкой. Таким образом, источник света должен быть виден в любом направлении, и любой предмет на пути света создает позади себя область, в которой свет либо отсутствует, либо изменяет свои свойства.

Вблизи источника света плотность излучаемой энергии высока, и, если здесь поместить приемник света, он воспримет значительную энергию, количество которой зависит от энергии, излучаемой источником в 1 *сек*. При увеличении расстояния от источника та же энергия приходится уже на значительно большее пространство и количество ее, падающее на данный приемник, сильно уменьшается. На больших расстояниях количество падающей на приемник энергии становится в конце концов настолько малым, что его не удается обнаружить независимо от природы и размеров источника.

Природа света

Свет, таким образом, создается источником и распространяется от него во всех направлениях с постоянной скоростью до тех пор, пока не изменится, натолкнувшись на какой-либо предмет или приемник. Отдельные фазы этого процесса будут подробно рассмотрены в последующих главах. Чтобы понять, каким образом может быть изменен, обнаружен или измерен свет, необходимо иметь несколько более полное представление о других его свойствах.

Мы уже рассмотрели вопрос о постоянстве скорости света, а также о том, что свет представляет собой энергию, распространяющуюся в пространстве. Каковы другие его свойства? В первую очередь свет следует рассматривать как нечто реальное. Подобно всем движущимся предметам, свет ударяет о встретившийся на его пути объект с определенной, хотя и очень маленькой силой (давление солнечного света на предметы было измерено). Кроме того, свет обладает свойством колебаться с исключительно высокой частотой.

Если мы попытаемся глубже разобраться в истинной природе света, то столкнемся с рядом специфических явлений. Многолетние исследования полностью подтвердили следующий факт. При попытке представить себе природу света приходится допустить, что свет способен вести себя так, будто он состоит из двух совершенно различных форм, действующих одновременно.

Первая из этих форм, так называемая волновая, в течение многих лет считалась полностью исчерпывающей всю суть явления. Согласно волновой теории, свет распространяется в виде непрерывных колебаний. Существование колебаний обосновывалось тщательными измерениями, показавшими, что в любой точке, через которую проходит свет, интенсивность его периодически меняется с частотой порядка $6 \cdot 10^{14}$ *гц*. Предполагалось, что свет, подобный солнечному, представляет собой совокупность всех возможных частот, лежащих в определенных пределах. Эти частоты перекрывают диапазон чувствительности глаза и находятся в определенных количественных соотношениях, необходимых для того, чтобы свет казался глазу белым.

Несколько легче понять новую, так называемую квантовую теорию света, согласно которой предполагается, что свет испускается отдельными порциями энергии — квантами, каждый из которых обладает определенной характеристической частотой и распространяется с постоянной скоростью. Количество испускаемых квантов настолько велико, что даже на больших расстояниях от источника между ними нельзя обнаружить «зазор». Белый свет с этой точки зрения состоит из потока множества таких квантов энергии, каждый из которых имеет свою собственную частоту. В любой точке, куда попадает белый свет, все видимые частоты излучения представлены в приблизительно равном количестве.

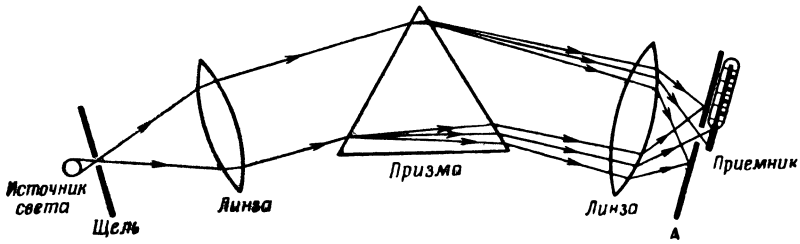
Трудно примирить эти два воззрения [1]. Современная наука доказывает, что квантовая теория, несомненно, более правильна. Для практических целей, однако, свет можно считать непрерывным в любой точке пространства, через которое он проходит, и состоящим из бесконечного множества периодических колебаний различной интенсивности. Частоты этих колебаний лежат в определенных пределах, а энергии колебаний различных частот находятся в определенном соотношении. Как частотный диапазон, так и относительное распределение энергии обусловливаются природой источника света. В данной книге свет будет рассматриваться именно с этой точки зрения, за исключением тех случаев, когда для объяснения некоторых менее знакомых явлений потребуется обра-

[1] Современная наука о свете является по существу синтезом волновой и квантовой теории света. Популярное изложение проблемы двойственности природы света можно найти в книге Д. Данина, Неизбежности странного мира, Изд-во Молодая гвардия, 1962.— *Прим. ред.*

титься к его квантовой природе. Обычно такие явления наблюдаются тогда, когда интенсивность света настолько мала, что становится заметным действие отдельных квантов. Примером могут служить свойства фотопленки при исключительно слабом освещении; они легко объясняются с помощью квантовой теории.

Возможность разложения света на его частотные составляющие впервые обнаружена Ньютоном. Узкий луч света, пройдя через стеклянную призму, падал на белую поверхность. При этом наблюдалось следующее явление: когда свет падал непосредственно на белую поверхность, на ней был виден кружок солнечного света, а в результате преломления света призмой появлялась радуга и кружок вытягивался в эллипс. В дальнейшем опыт усовершенствовали, благодаря чему удалось разделить области разных частот и в конце концов их измерить. Позднее измерили также и скорость света, которая в свободном пространстве оказалась постоянной (она изменяется при прохождении света в веществе) и равной независимо от частоты 300 000 *км/сек*. Полная характеристика луча света, достаточная для наших целей, должна содержать данные о направлении (или направлениях) его распространения, частоте (или диапазоне частот), а также об абсолютном или относительном распределении интенсивности в данной частотной области. Чтобы получить такую информацию, необходимо разложить свет на его частотные составляющие и измерить интенсивность групп смежных частот; в общем случае это следует проделать во всех направлениях от точки, в которой производятся измерения. Приборы для разложения света на частотные составляющие называются спектроскопами. Они основаны по существу на ранее упомянутом усовершенствованном методе Ньютона. На фиг. 2.1 показана оптическая схема прибора. Свет от источника проходит через узкую щель, падает на линзу и в результате преломления превращается в параллельный пучок лучей. Вблизи линзы помещается прозрачная, хорошо отполированная призма (обычно стеклянная), ось которой параллельна щели. Присутствующие в световом луче излучения различной частоты проходят через призму разными путями и отклоняются ею на величину, зависящую от частоты. Излучения низкой частоты отклоняются слабее, высокой — сильнее. По выходе из призмы свет улавливается другой линзой, которая образует изображение щели на некоторой поверхности, обозначенной буквой A. Поскольку излучения различных частот систематически отклоняются на разную величину, изображение щели не является одиночной линией, а представляет собой серию непрерывно перекрывающихся линий, сдвинутых в направлении, перпендикулярном щели. Такая смещенная серия изображений позволяет обнаружить последовательную смену цвета излучений различных частот, подобную цветам радуги. Если источником света служит солнце или другой

объект, испускающий свет за счет высокой температуры, то низкочастотный край полосы, называемый спектром, кажется красным, а высокочастотный — синим или фиолетовым; между краями цвет непрерывно изменяется, переходя от оранжевого к желтому и зеленому.



Ф и г. 2.1. Схематическое изображение оптической системы спектроскопа.

Спектрофотометрия

Любой заданный участок спектра имеет определенные частотные границы, количество энергии внутри которых может быть измерено. Общепринятая техника измерений заключается в выделении измеряемого участка спектра с помощью второй щели, за которой помещается приемник, улавливающий прошедший через щель свет. Прибор, предназначенный для выделения таким способом узкого участка спектра, называется монохроматором, а прибор, измеряющий относительное или абсолютное количество энергии в узких участках спектра,— спектрофотометром или спектрорадиометром. Если приемник, измеряющий излучение, соединить с оптической системой спектроскопа, изображенной на фиг. 2.1, то получим схему спектрорадиометра.

При изучении света следует отличать непосредственное измерение энергии светового луча от сравнения этой энергии с энергией другого источника при помощи какого-либо приемника. Первый вид измерений называется спектрорадиометрией, второй — спектрофотометрией. На практике обычно пользуются термином «спектрофотометрия», так как приборы для такого рода измерений более известны. Термин этот часто употребляют неправильно, применяя его к приборам спектрорадиометрического типа [1].

Результаты измерений, полученные с помощью спектрофотометров и спектрорадиометров, имеют решающее значение для всей

[1] Проводимое автором разделение спектральных измерений на спектрорадиометрию и спектрофотометрию весьма условно, так как все спектральные измерения проводятся путем сопоставления измеряемого излучения с некоторым эталонным. Обычно термин «спектрорадиометрия» относится к измерениям спектров излучения источников света. — *Прим. ред.*

проблемы цвета. Не будет преувеличением сказать, что без знакомства с этими результатами невозможно составить себе сколько-нибудь ясное представление о цветовых явлениях. Однако если научиться рассматривать свет с точки зрения относительного количества энергии, содержащегося в различных частотных участках его спектра, а не с точки зрения видимого цвета, то станут очевидными многие явления, которые без этого понять довольно трудно. Далее в этой главе приводится объяснение указанного способа изучения света. Основу физики цвета составляют результаты спектрофотометрических измерений, выражаемые так называемыми спектрофотометрическими кривыми. Цель спектрофотометрии или спектральных измерений заключается в том, чтобы определить, каково распределение энергии в спектре излучения. Подлежащий измерению луч света может испускаться тем или иным источником излучения непосредственно или претерпеть после выхода из источника многочисленные изменения. Цель измерения заключается в том, чтобы определить относительное распределение энергии, существующее в данный момент. Результаты этих измерений можно затем использовать либо для изучения изменений, каким подвергся свет, излученный источником, либо для определения природы самого источника.

Непосредственное измерение частоты луча монохроматического света — задача трудная, требующая притом специального оборудования; к счастью, для целей спектрофотометрии в таких измерениях нет необходимости. Если спектрофотометр был однажды налажен, то свет определенной частоты всегда отклоняется в одну и ту же точку спектра. Таким образом, если частота, соответствующая каждой точке, известна, то нет надобности налаживать спектрофотометр заново[1]. Задача, следовательно, сводится к измерению интенсивностей в различных участках спектра и выражению полученных результатов таким образом, чтобы они были понятны.

Существуют два вида измерений интенсивности, результаты которых выражаются в различных единицах. Количество энергии, падающей на приемник, можно измерить либо непосредственно (радиометрия) и выразить в абсолютных единицах, либо путем сравнения с некоторой произвольной величиной (фотометрия) и выразить в процентах от этой величины. По ряду причин, главным образом из-за простоты измерений, фотометрия применяется значительно чаще; здесь будет рассмотрен лишь этот вид измерений. Абсолютные измерения энергии необходимы во многих областях науки (фото-

[1] Проверка и градуировка шкалы монохроматора по длинам волн производятся с помощью специальных спектральных ламп, в которых при разряде в парáх ртути, кадмия, натрия и других металлов излучается линейчатый спектр.— *Прим. ред.*

химия, физика и др.), но их редко используют при изучении цвета. Широко применяются и весьма необходимы измерения полной энергии спектрально неразложенного света; о них будет сказано ниже в этой главе, а также в гл. IV.

Приемники

Свет, падающий на приемник, вызывает определенную реакцию, природа которой зависит от типа приемника. В случае фотоэлемента реакцией будет электрический ток, величина которого может быть измерена соответствующим прибором. Использование так называемого болометра основано на свойстве зачерненной платиновой проволочки изменять свое электрическое сопротивление при повышении температуры в результате поглощения проволочкой падающей на нее световой энергии. Подобным же образом устроен «термостолбик», в котором электрический ток возникает в результате нагревания зачерненного спая двух разнородных металлов за счет поглощения света.

В фотоэлементе свет превращается в электрическую энергию непосредственно; в первых двух приемниках он превращается сначала в тепло, которое затем создает или регулирует электрическую энергию. Независимо от вида превращения вызываемое приемником срабатывание измерительного прибора указывает лишь на то, что в приемнике произошло какое-то изменение. Чтобы расшифровать его, необходимо знать, какое изменение производится известным количеством энергии, т. е. произвести так называемую градуировку прибора. Абсолютную градуировку легче всего произвести на приемниках, превращающих свет в тепло, так как при этом нетрудно вычислить изменение температуры, вызываемое заданным количеством света. Если один раз измерить эталонный [1] источник света абсолютными способами, то затем с его помощью легко отградуировать любое другое устройство. Такая градуировка позволяет в дальнейшем легко производить относительные измерения интенсивности света; в любом узком диапазоне частот интенсивность выражается в определенных долях или процентах от энергии некоторого известного (эталонного) источника света.

Графическое представление результатов

Этот вид измерений настолько обычен и вместе с тем важен для цвета, что в методах представления его результатов существует

[1] В качестве образцового источника с известным спектральным распределением энергии используется так называемое абсолютно черное тело или лампа накаливания с известной цветовой температурой излучения (см. гл. III).— *Прим. ред.*

немало условностей. Перед дальнейшим рассмотрением приемников необходимо понять эти методы и научиться ими пользоваться. Уже отмечалось, что двумя переменными в спектрофотометрии являются частота света и его интенсивность. Можно представить результаты измерений в виде таблицы, в которой приведены средние частоты промеренных участков спектра и полученные в них значения интенсивности. Однако из такой таблицы трудно составить наглядное представление о спектральном распределении энергии света. Значительно полезней представить полученные данные в виде кривой, позволяющей непосредственнно производить оценку соотношения энергий различных длин волн. По спектрофотометрическим данным (табл. 2.1) на фиг. 2.2 построена соответствующая кривая.

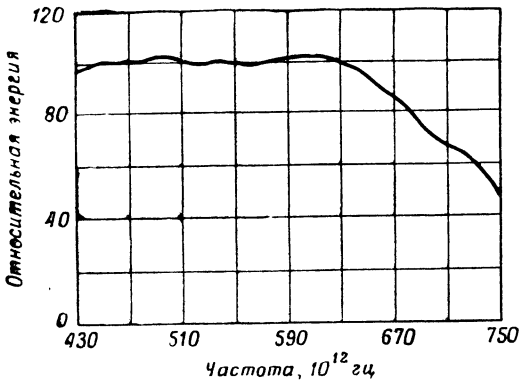
Таблица 2.1

Относительное спектральное распределение энергии солнечного света

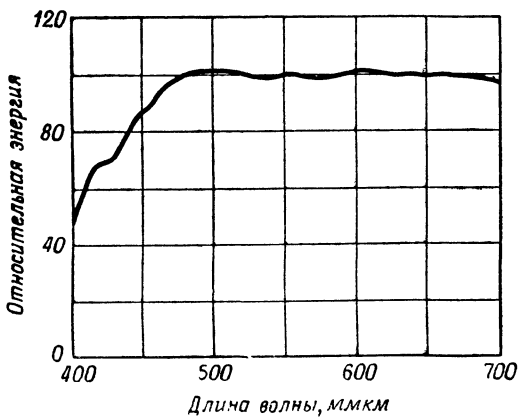
Частота, 10^{12} *гц*	Относительная энергия	Частота, 10^{12} *гц*	Относительная энергия
430	97,7	600	102,3
440	99,3	610	101,2
450	99,8	620	100,2
460	99,9	630	98,7
470	100,0	640	96,7
480	100,1	650	92,9
490	100,8	660	89,4
500	101,3	670	85,2
510	100,4	680	79,6
520	99,8	690	74,1
530	99,7	700	69,3
540	100,2	710	67,8
550	99,9	720	64,9
560	99,1	730	61,1
570	99,6	740	55,0
580	100,5	750	44,8
590	101,1		

К сожалению, многие работающие в области цвета не умеют пользоваться кривыми для иллюстрации подобных измерений. Уместно, пожалуй, посоветовать читателю, который никогда этим не занимался, «вооружиться» карандашом и листом бумаги и по данным таблицы самостоятельно построить кривую. На фиг. 2.2 по

оси абсцисс отложена частота спектра. Такой диапазон частот выбран потому, что за его пределами глаз не чувствителен к излучению и, следовательно, нельзя говорить о цвете излучения. Результаты измерений откладываются по оси ординат. До сих пор



Ф и г. 2.2. Спектральное распределение энергии солнечного света.

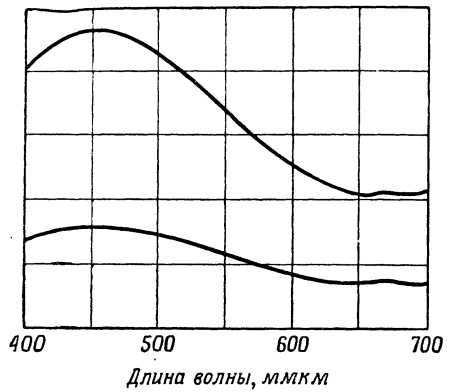


Ф и г. 2.3. Спектральное распределение энергии солнечного света.

при рассмотрении световых колебаний мы пользовались понятием «частота колебаний», что является наиболее логичным и полезным подходом с точки зрения квантовой теории света. Однако с точки зрения волновой теории желательно говорить о длине световой

волны, понимая под этим расстояние между двумя точками пространства, в которых интенсивность волны одинакова.

Радиоволны являются также одной из форм электромагнитной энергии, подобной свету, но со значительно меньшей частотой колебаний. Сначала в радиотехнике было принято говорить о длине волны, излучаемой станцией, но постепенно вместо длины волны, на которой ведется радиовещание, стали пользоваться частотой (*кгц*). И световые волны и радиоволны распространяются с одинаковой скоростью, равной примерно 300 000 *км/сек*. Если частота какого-то монохроматического света составляет $500 \cdot 10^{12}$ *гц*, то, разделив скорость на частоту, получим расстояние, пройденное волной за один период, равное $3/5 \cdot 10^{-6}$ *м*; это и есть длина волны данного монохроматического излучения. Так как получившееся расстояние исключительно мало и измерять его в метрах крайне неудобно, были введены две новые единицы. Одна из них, называемая миллимикроном и обозначаемая обычно *ммкм*, равна 10^{-9} *м*, а другая, в 10 раз меньшая, названа ангстремом в честь шведского астронома Андерса Йонаса Ангстрёма и обозначается символом Å. Видимый спектр простирается приблизительно от 400 до 700 *ммкм*, или от 4000 до 7000 Å. Если пользоваться этими единицами, то фантастически малые размеры не причиняют никаких неудобств.

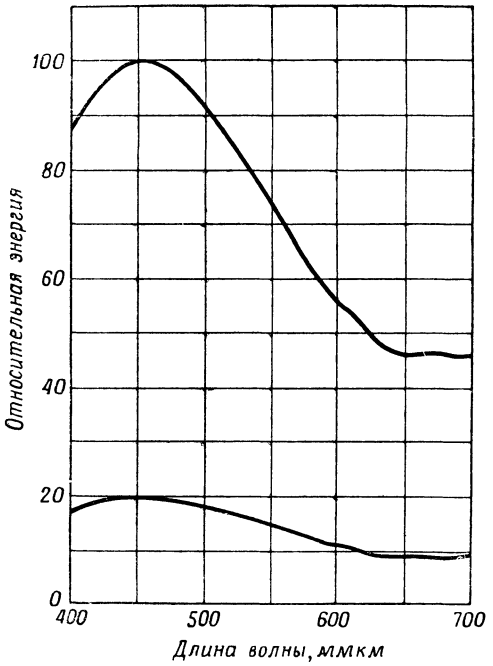


Фиг. 2.4. Одинаковые относительные спектральные кривые, построенные в произвольных масштабах, один из которых втрое больше другого.

Кривые спектрального распределения энергии, построенные в зависимости от длины волны и от частоты, совершенно различны. Кривая фиг. 2.2, перестроенная в зависимости от длины волны, показана на фиг. 2.3. Рассматривая такие кривые, нужно помнить, что по оси ординат откладываются относительные интенсивности, а не абсолютные. Это значит, что поскольку масштаб выбран произвольно, его можно увеличить или уменьшить совершенно независимо от характера представляемых данных. Так, например, обе кривые на фиг. 2.4 представляют одни и те же данные, но построены они в разном масштабе. Так, на фиг. 2.5 показаны кривые, построенные для света одинакового спектрального состава, но при построении одной из них максимум энергии был условно при-

нят за 100, а другой за 20. С точки зрения относительного распределения энергии обе кривые идентичны, хотя на первый взгляд кажутся совершенно различными.

Следует отметить, что для анализа некоторых кривых подобного типа необходимо знать полосу частот, использовавшуюся при

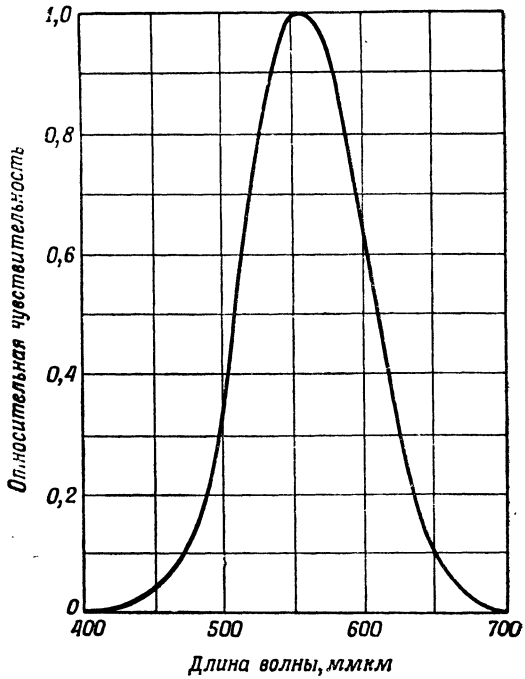


Фиг. 2.5. Две кривые относительного распределения энергии для света с одинаковым спектрофотометрическим составом.

отдельных измерениях, по результатам которых построена кривая. Истинный масштаб подобной кривой должен быть выражен только как интенсивность, отнесенная к определенному диапазону длин волн или частот; например, интенсивность в диапазоне длин волн шириной 10 *ммкм*.

Целью спектральных измерений является определение физической природы луча света путем выяснения относительного или абсолютного распределения его энергии по частотам или длинам

волн. Таким путем можно описать природу света, излучаемого источником, или определить, как изменяется свет известного состава при взаимодействии с некоторым объектом. Спектральный состав света, излучаемого различными источниками, будет рассмотрен в



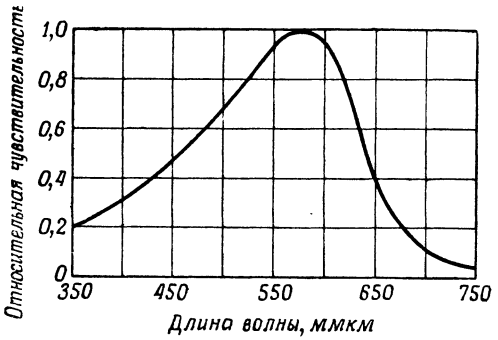
Ф и г. 2.6. Относительная чувствительность человеческого глаза (кривая видности стандартного наблюдателя МКО).

гл. III и IV, а его изменение при взаимодействии с различными объектами — в гл. V. Однако прежде всего важно разобраться, что происходит при воздействии на приемник спектрально не разложенного света.

В предыдущих рассуждениях предполагалось, что каждое измерение было выполнено в очень узком диапазоне длин волн спектра. При этом чувствительность приемника к различным частотам внутри этого диапазона считали постоянной, и для получения желаемой информации необходимо было только знать, как изменяется реакция приемника с изменением интенсивности света. Если подлежащий измерению свет охватывает более широкий участок спект-

ра или если приемник непосредственно облучается источником, то необходимо учитывать влияние на него света различной частоты.

Ранее уже отмечалось, что известно очень мало приемников, чувствительность которых не зависит от частоты. Весьма близко удовлетворяют этому требованию болометр и термостолбик. Они являются почти единственными приемниками такого рода, так как превращение света в тепло при поглощении его абсолютно черной поверхностью — одно из немногих превращений света, не зависящих от длины волны. Чувствительность фотоэлементов всех типов,



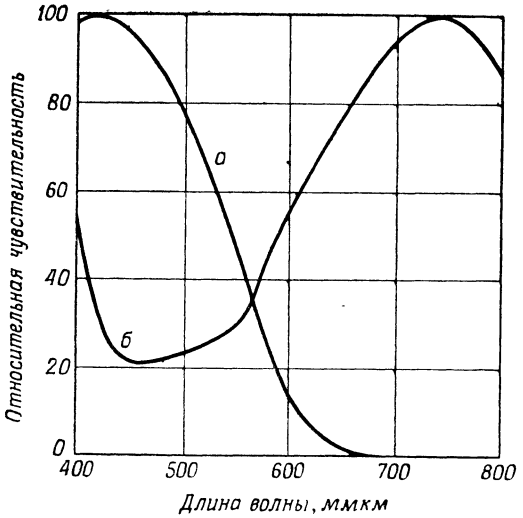
Ф и г. 2.7. Относительная спектральная чувствительность селенового фотоэлемента «Фотроник» фирмы «Вестон».

глаза, фотоэмульсии, а также фотохимических приемников зависит от частоты света. Многие из них чувствительны только к узкому участку спектра.

Подобно тому как строятся кривые, показывающие относительную интенсивность излучения источника для разных частот, можно построить кривые, показывающие относительную чувствительность приемника к излучению разных частот. В качестве примера на фиг. 2.6 приведена кривая спектральной чувствительности глаза при нормальных уровнях дневного освещения.

Кривые подобного типа характеризуют относительную чувствительность. Однако во всех случаях такие кривые получают путем определения энергии излучения данной длины волны, необходимой для обеспечения заданной реакции приемника (для глаза добиваются равенства яркостей; для других приемников — заданного фототока). Затем строят обратную кривую, показывающую чувствительность приемника к данному количеству энергии различных длин волн. Процесс получения числовых значений для построения этой кривой состоит в делении произвольной величины (обычно

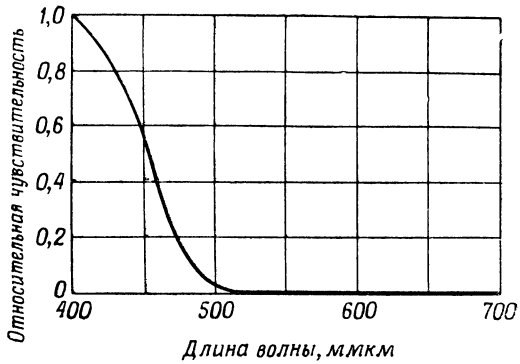
единицы) на измеренное количество необходимой энергии. Так, если для получения одинаковой реакции приемника для первой длины волны понадобилась энергия, в 5 раз большая, чем для второй, то чувствительность приемника к этой длине волны в 5 раз меньше. При построении кривой фиг. 2.6 максимальная чувствительность глаза, т. е. чувствительность его к той длине волны, в которой для достижения заданной яркости понадобилась минимальная энергия, была принята за единицу.



Ф и г. 2.8. Относительная спектральная чувствительность двух типов фотоэлементов. Кривые нанесены в разных масштабах. [G l o v e r A. M., M o o r e A. R., *J. of the Society of Motion Picture Engineers*, **46**, 380 (1946).]

а — RCA 1P37; *б* — RCA 868.

На фиг. 2.7 показана кривая спектральной чувствительности селенового фотоэлемента, применяемого в фотоэкспозиметре фирмы «Вестон». Из рисунка следует, что спектральная чувствительность экспозиметра совсем иная, чем чувствительность глаза. Кривая (*б*) для фотоэлемента RCA 868, часто используемого в системах звукового воспроизведения, показана на фиг. 2.8; здесь же приведена кривая (*а*) для фотоэлемента «с голубой» чувствительностью (RCA 1P37), выпускаемого для той же цели и рекомендованного для использования с некоторыми типами звуковых дорожек в цветных фильмах. На фиг. 2.9 приведена кривая чувствительности нормальной фотоэмульсии из чистого бромистого серебра.



Ф и г. 2.9. Относительная спектральная чувствительность в видимой части спектра фотопленки, чувствительной к синему свету.

Суммарная реакция приемника

Если на каждый из приемников, спектральные кривые чувствительности которых уже рассматривались, падает свет, содержащий одинаковое количество энергии *для всех* длин волн, то совершенно очевидно, что реакции этих приемников будут различными. Еще важнее то обстоятельство, что каждый приемник по-разному оценит энергию света, содержащуюся в данной спектральной области излучения источника, *по сравнению с его полной энергией.*

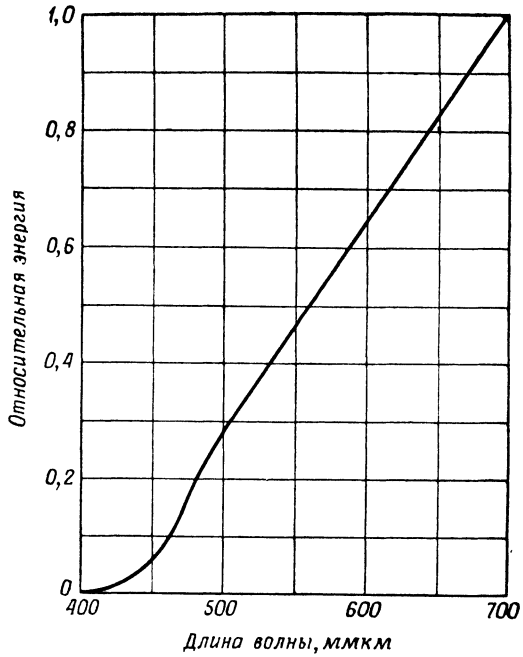
Так, в интервале длин волн 550—600 *ммкм* свет очень сильно действует на глаз и на селеновый фотоэлемент, но довольно слабо — на фотоэлемент, чувствительный к голубой части спектра, и совершенно не действует на фотоэмульсию, кривая чувствительности которой показана на фиг. 2.9.

Когда измеряется свет, не разложенный на узкие частотные области, необходимо учитывать кривую спектральной чувствительности приемника и распределение энергии источника. Действие светового луча на один приемник еще ничего не говорит о степени его воздействия на другой. Если известны спектральная чувствительность обоих приемников и распределение энергии источника, то сравнительно легко оценить относительное воздействие света на оба приемника.

Предположим, например, что свет, энергия которого распределена в соответствии с фиг. 2.10, падает на фотоматериал со спектральной чувствительностью, соответствующей кривой фиг. 2.9. Допустим далее, что требуется вычислить эффективную интенсивность этого света для фотопленки и для глаза по сравнению с той, которую дает источник, излучающий одинаковое количество энергии

всех длин волн. (Такой вымышленный источник называют обычно равноэнергетическим.)

Чтобы определить реакцию каждого приемника, необходимо последовательно рассмотреть результат действия на приемник каждого участка длин волн, а затем полученные результаты сложить.



Ф и г. 2.10. Кривая спектрального распределения света лампы накаливания со светофильтром.

Относительная интенсивность света в диапазоне длин волн 605—615 *ммкм* равна 0,6808. (Здесь не играет роли, к какой величине она отнесена, поскольку те же величины будут использованы и для равноэнергетического источника. Определяется отношение реакций приемника при воздействии на него данного и равноэнергетического источников; затем это отношение сравнивается с аналогичным отношением для глаза.) Чувствительность пленки в этой области равна нулю, следовательно, последняя, как и более длинноволновые, не окажет на пленку никакого воздействия. Чувствительность к излучению с длиной волны 400—420 *ммкм* равна 0,95, но так как относительное количество энергии, излучаемое источником в этой области спектра, составляет всего 0,0084, то, несмотря

Таблица 2.2

Данные, использованные для сравнения реакции глаза и несенсебилизированной пленки на свет обычной лампы накаливания

Длина волны, *ммкм*	Относительная энергия источника света	Относительная чувствительность		Произведение столбцов	
		пленки	глаза	II×III	II×IV
I	II	III	IV	V	VI
400	0,0065	1,0000	0,0004	0,006500	0,000003
410	0,0084	0,9450	0,0012	0,007938	0,000010
420	0,0129	0,8780	0,0040	0,011326	0,000052
430	0,0203	0,7890	0,0116	0,016017	0,000235
440	0,0340	0,6780	0,0230	0,023052	0,000782
450	0,0544	0,5500	0,0380	0,029920	0,002067
460	0,0880	0,3950	0,0600	0,034760	0,005280
470	0,1290	0,2440	0,0910	0,031476	0,011739
480	0,1781	0,1330	0,1390	0,023687	0,024756
490	0,2336	0,0670	0,2080	0,015651	0,048589
500	0,2785	0,0260	0,3230	0,007241	0,089956
510	0,3169	0,0110	0,5030	0,003486	0,159401
520	0,3535	0,0000	0,7100		0,250985
530	0,3889		0,8620		0,335232
540	0,4239		0,9540		0,404401
550	0,4593		0,9950		0,457004
560	0,4954		0,9950		0,493023
570	0,5322		0,9520		0,506750
580	0,5695		0,8700		0,495465
590	0,6065		0,7570		0,459121
600	0,6436		0,6310		0,406112
610	0,6808		0,5030		0,342442
620	0,7180		0,3810		0,273558
630	0,7549		0,2650		0,200048
640	0,7915		0,1750		0,138512
650	0,8278		0,1070		0,088575
660	0,8635		0,0610		0,052674
670	0,8987		0,0320		0,028758
680	0,9332		0,0170		0,015864
690	0,9670		0,0082		0,007929
700	1,0000		0,0041		0,004100
Общая сумма		5,7160	10,6815	0,211054	5,303423

$$\frac{\Sigma V}{\Sigma III}=0{,}03692;\quad \frac{\Sigma VI}{\Sigma IV}=0{,}4965;\quad \frac{\Sigma V/\Sigma III}{\Sigma VI/\Sigma IV}=\frac{0{,}03692}{0{,}4965}=0{,}074.$$

на высокую чувствительность приемника, результирующее действие окажется незначительным. Во всех случаях относительная реакция на каждую область спектра выразится произведением относительной энергии света, содержащейся в данной области, на относительную чувствительность приемника. Сумма этих произведений даст полный *относительный* выход. Поскольку относительная интенсивность равноэнергетического источника для всех длин волн равна единице, полный относительный выход такого источника является суммой относительных чувствительностей, вычисленных для каждой спектральной области. Эти расчеты, кажущиеся сложными, в действительности предельно просты и дают возможность получить две суммы: относительную реакцию на свет данного спектрального состава и относительную реакцию на свет равноэнергетического источника. Отношение этих сумм дает соотношение между реакцией приемника на рассматриваемый свет и реакцией на равноэнергетический свет. Если выполнить аналогичные расчеты для глаза (см. фиг. 2.6), то может быть получено подобное же соотношение. Так как вычисление обоих соотношений производилось путем сопоставления рассматриваемого света и равноэнергетического, их можно непосредственно сравнивать между собой. В результате вычислений были получены следующие данные: для пленки — 0,03692 и для глаза — 0,4965. Таким образом, соотношение между действием рассмотренного света на пленку и на глаз составляет лишь 0,074 значения, которое могло быть получено при освещении тех же приемников равноэнергетическим источником. Ход вычислений показан в табл. 2.2.

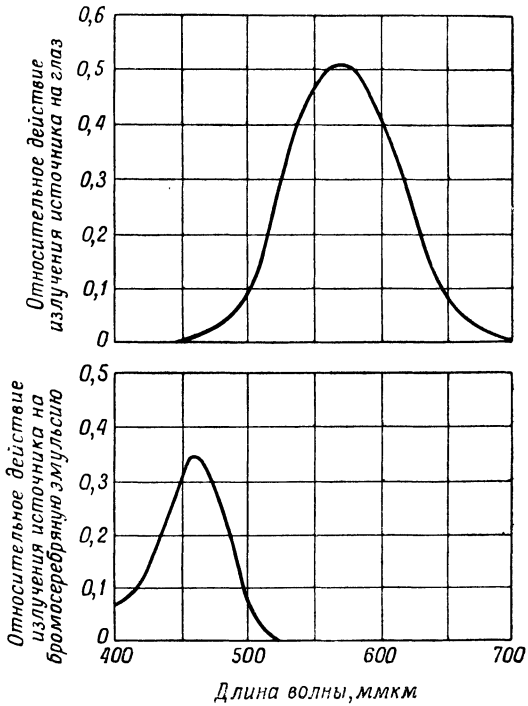
Таким образом, относительная реакция приемника на свет любого источника представляет собой сумму произведений относительной интенсивности и относительной чувствительности для каждого участка длин волн. Тот, кто знаком с высшей математикой, поймет, что при этом вычисляется интеграл произведения спектральных кривых источника света и приемника [1].

Чтобы лучше представить себе реакции подобных приемников при воздействии на них света от заданного источника, иногда строят кривые, показывающие для всех участков длин волн произведение относительного количества света в каждом участке на относительную чувствительность приемника в том же участке. Такие кривые дают представление об относительной роли различных участков спектра в общей реакции приемника. Подобные кривые для двух разобранных выше случаев показаны на фиг. 2.11.

---

[1] Расчет суммарного действия излучения на приемник по методу, изложенному автором, применим только для приемников, обладающих линейной зависимостью фототока от освещенности и подчиняющихся законам аддитивности.— *Прим. ред.*

Важным положением во всех рассуждениях, которое подчеркивалось в ходе изложения, является то, что в любом случае имеет значение не распределение энергии света или чувствительности приемника в отдельности, а сумма их произведений для всех длин волн. В следующих главах будет показано, что подобные приемы



Ф и г. 2.11. Кривые, показывающие действие отфильтрованного света лампы накаливания на глаз и фотоэмульсию.

позволяют выявить действие на луч света цветных предметов. Именно такой способ рассмотрения света и световых явлений, заключающийся в систематическом анализе действия отдельных участков спектра и дальнейшем определении полного эффекта, является ключом к решению большинства проблем, возникающих при изучении цвета. Читатель должен хорошо уяснить и запомнить основные положения настоящей главы, прежде чем пытаться понять материал, излагаемый ниже, так как эти положения являются фундаментом всей науки о цвете.

ГЛАВА III

Источники света

В предыдущей главе было показано, что существование излучения в виде света неизбежно указывает на присутствие источника, испускающего этот свет. В данной главе рассматриваются подобные источники, а также условия, при которых создается излучение, и природа этого излучения.

Излучение света

Согласно современным теориям, свет создается за счет высвобождения энергии движения электронов, находящихся на внешних орбитах атомов. Когда эти электроны поглощают какую-либо энергию, они приходят в состояние усиленного движения. Возвращаясь (обычно внезапно) в нормальное состояние, они испускают электромагнитное излучение [1]. Такое поглощение и высвобождение энергии может происходить множеством различных путей, зависящих от природы полученной энергии. Из всех возможных видов энергии, способных вызвать такой эффект, наиболее обычной является, вероятно, тепловая. Если любой материал, не разрушающийся при высоких температурах, нагревать, то в конце концов он начинает испускать видимый свет. Тепловая энергия превращается в механическую энергию атомов и затем испускается ими в виде света. Тела, не устойчивые при высокой температуре, при поглощении энергии превращаются в жидкости или газы с повышенным содержанием энергии.

Излучение света под влиянием высоких температур лежит в основе большинства известных источников света. К таким источникам относятся: Солнце, лампы накаливания, пламя свечи, тлеющие угли, горячие металлы и т. п.; их называют тепловыми излучателями. Спектральное распределение энергии большинства подобных источников уже определено. Часть из них классифицируется как группа излучателей, называемых абсолютно черным телом.

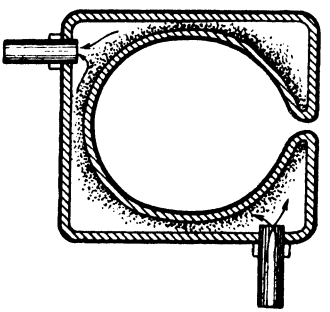
---

[1] Автор дает весьма упрощенно картину возникновения излучения. Обычно поглощение энергии и излучение света связаны с переходом электрона с одного энергетического уровня на другой.— *Прим. ред.*

Прежде чем приступить к рассмотрению спектров существующих источников, полезно разобраться в значении понятия «черный излучатель» и получить некоторое представление о термине «цветовая температура».

Абсолютно черное тело

Если замкнутую полость из какого-либо материала нагреть до достаточно высокой температуры, она начинает испускать свет. Внутри такой полости свет просто переходит от одной стенки к другой, т. е. он испускается одной нагретой стенкой, поглощается противоположной и вновь превращается в тепло. Если температуру стенок поддерживать постоянной, то тепло внутри полости не может ни создаваться, ни исчезать; более того, поскольку свет излучается каждой точкой во всех направлениях, то внутренние участки полости постоянно поглощают и излучают одно и то же количество энергии. Если теперь в такой замкнутой полости проделать маленькое отверстие, то количество выходящего через него света будет равно получаемому любым другим подобным участком внутренней поверхности. Справедливо также заметить, что это будет максимальным количеством света, которое может выйти через отверстие. Если снаружи через это отверстие в полость входит свет, он поглощается внутри этой полости, и если разница между входящим и выходящим светом не столь велика, чтобы изменить температуру полости, то количество испускаемого света не увеличится. Тело, которое полностью поглощает падающее на него излучение, называется абсолютно черным телом, а излучение, испускаемое через маленькое отверстие в его оболочке,— излучением абсолютно черного тела. Устройство, подобное описанному, изображено на фиг. 3.1.

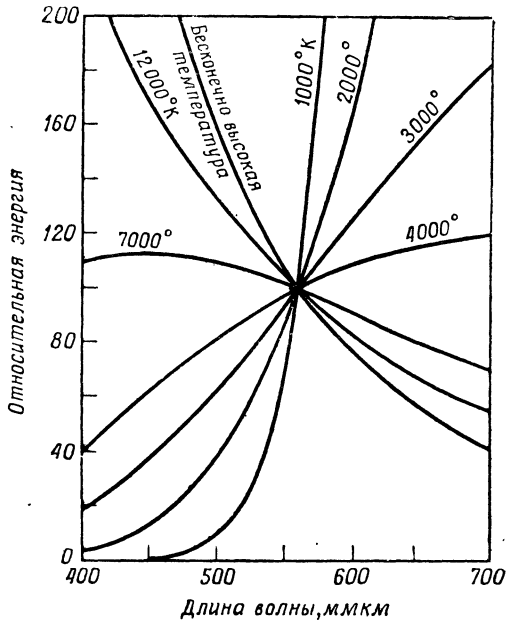


Фиг 3.1. Разрез простого черного излучателя, состоящего из оболочки, окруженной расплавленным или кипящим веществом.

Спектральное распределение излучения зависит только от температуры вещества.

Распределение энергии выходящего через узкое отверстие света зависит только от температуры окружающих стенок. Это распределение можно вычислить на основании чисто теоретических рассуждений. Кривые относительного распределения энергии абсолютно черного тела, рассчитанные для широкого диапазона температур, приведены на фиг. 3.2. Чтобы упростить сравнение кривых,

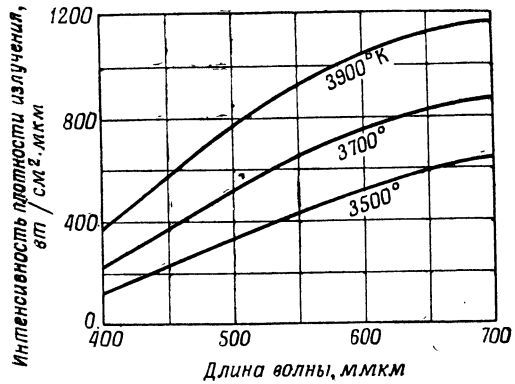
относительная энергия, соответствующая длине волны 560 *ммкм*, была принята для всех кривых одинаковой. Если нанести истинные значения энергии, то даже в достаточно узком диапазоне температур относительные размеры кривых делают сравнение затруднительным. Такие кривые для нескольких значений температур (в градусах Кельвина) приведены на фиг. 3.3.



Ф и г. 3.2. Относительное спектральное распределение энергии абсолютно черного тела при разных температурах.

Подобно тому как воспринимаются отдельные участки спектра, различные распределения энергии воспринимаются глазом в виде разных цветов. Каждому известно, что если кусок металла нагревать до возникновения свечения, то независимо от способа нагрева — электрическим током или пламенем — первое заметное на глаз свечение покажется красным. При более высоких температурах оно станет оранжевым, а затем — желтым. Теоретические кривые излучения абсолютно черного тела позволят нам в дальнейшем рассчитать, что при еще более высоких температурах излучение становится белым, а при самых высоких — голубым. По этой причине Солнце кажется белым; за исключением некоторых звезд,

нам не известны тела, нагретые настолько, чтобы казаться голубыми. Голубой цвет освещаемого Солнцем неба объясняется совершенно иной причиной.



Ф и г. 3.3. Спектральная интенсивность плотности излучения абсолютно черного тела при разных температурах.

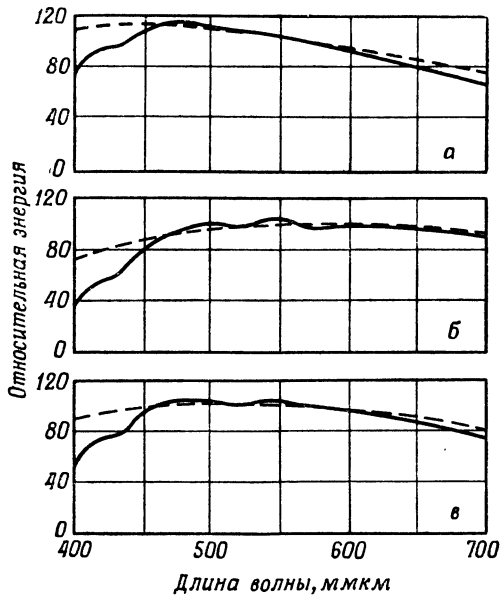
Цветовая температура

Понятие «цветовая температура» появилось в связи с систематическим изменением цвета при изменении температуры абсолютно черного тела. Если известно, что свет, излучаемый светящимся объектом, подчиняется законам излучения абсолютно черного тела, то обозначение цвета этого объекта может служить мерой его температуры. С другой стороны, характеристика цвета с помощью температуры для таких объектов полностью определяет спектральное распределение энергии излучения. Эти соображения, однако, являются чисто теоретическими. Необходимо точно знать, действительно ли для данного излучателя энергия света распределяется в спектре излучения по законам абсолютно черного тела. Установлено, что очень немногие материалы строго подчиняются этим законам и что применение теоретических рассуждений к реальным источникам является по сути дела лишь удобным приближением. Вместо перечисления материалов, подчиняющихся этим законам, детально рассмотрим отдельные источники света, причины их излучения и степень приближения этого излучения к излучению абсолютно черного тела. Сначала рассмотрим температурное излучение.

Солнечный свет

Солнечный свет создается благодаря высокой температуре Солнца. Распределение его энергии в видимой части спектра за преде-

лами земной атмосферы близко к распределению энергии абсолютно черного тела при температуре 6565° К. Предполагается, что такова истинная эффективная температура окружающей Солнце внешней газовой оболочки, от которой мы получаем свет. При прохождении света через земную атмосферу он в значительной степени

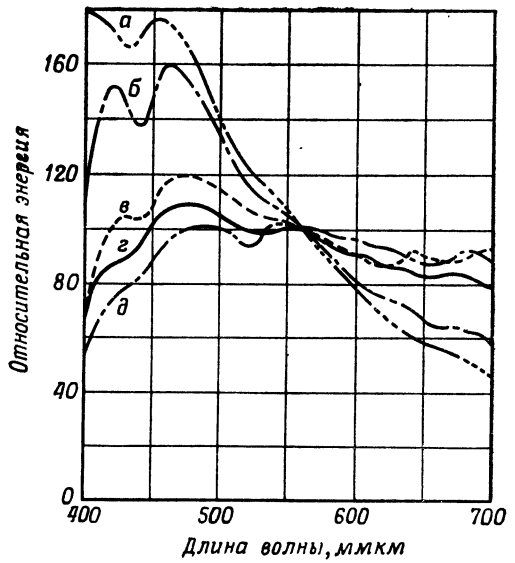


Ф и г. 3.4. Кривые спектрального распределения энергии солнечного света по сравнению с распределением абсолютно черного тела того же цвета. [Данные солнечного света по D a v i s R., G i b s o n K. S., Bureau of Standards Misc. Publication, № 114, 16 (1931).]

а — излучение Солнца вне атмосферы, — — — абсолютно черное тело при 6500° К; *б* — полуденное зимнее солнце, — — — абсолютно черное тело при 5077°К; *в* — полуденное летнее солнце, — — — абсолютно черное тело при 5740° К.

ослабляется (особенно в коротковолновой области спектра), и спектр солнечного света на поверхности земли уже не совпадает с подлинной кривой излучения абсолютно черного тела. На фиг. 3.4 показаны кривые излучения абсолютно черного тела, цвет которого наиболее близок к цвету Солнца за пределами земной атмосферы, а также зимнего и летнего полуденного солнца в Вашингтоне (США). Совпадение спектральных кривых, как видно из рисунка, не слишком хорошее, особенно в голубой части спектра. В другое

время суток, отличное от полуденного, солнечный свет попадает на поверхность земли, пройдя бóльшую толщу воздуха, и потери в атмосфере влияют на его спектральное распределение еще сильнее. На спектральное распределение энергии может заметно влиять также ряд других факторов, например направление распространения света, атмосферные условия и т. п.; типичные кривые распределения энергии для пяти различных случаев показаны на фиг. 3.5.



Фиг 3.5. Кривые спектрального распределения энергии света, излучаемого небом под разными направлениями и при различных условиях в Кливленде, шт. Огайо. [Taylor A. H., Kerr G. P., *J. of the Opt. Soc. of America*, **31**, 7 (1941).]

а — свет неба в зените; *б* — свет северного неба; *в* — полностью покрытое облаками небо; *г* — солнце на чистом небе; *д* — прямой солнечный свет.

Следует отметить, что увеличение толщи атмосферы, сквозь которую проходит солнечный свет, приводит к последовательному изменению его белого цвета на желтый, оранжевый и красный, подобно тому как это имеет место при уменьшении температуры абсолютно черного тела; однако получающееся относительное спектральное распределение энергии все меньше соответствует распределению энергии излучения абсолютно черного тела. Отметим, однако, что этот факт иллюстрирует одно обстоятельство, на котором

мы подробнее остановимся в следующих главах. Видимый цвет источника света не определяет его спектральное распределение энергии. Цвет приобретает значение здесь лишь тогда, когда на основе выполненных измерений *уже известно* вероятное спектральное распределение. Особенно обманчивы в этом отношении такие источники света, как современные люминесцентные лампы, спектр излучения которых имеет очень мало общего со спектром излучения абсолютно черного тела того же цвета.

Накаленный вольфрам

Самым распространенным в настоящее время источником искусственного света является электрическая лампа накаливания. Как уже говорилось выше, такие лампы испускают свет благодаря высокой температуре вольфрамовой нити накала. Нить нагревается за счет высокого сопротивления проволочки при протекании через нее электрического тока. Это является примером превращения электрической энергии в тепловую, которая затем превращается в свет.

Распределение энергии света подобных ламп почти полностью зависит от температуры вольфрамовой нити. Нагретая нить, помещенная внутрь стеклянной колбы, не излучает свет в точном соответствии с законами абсолютно черного тела, а следовательно, и распределение энергии не будет точно таким, как у абсолютно черного тела, при такой же температуре. Излучение, однако, столь полно определяется нагревом проволоки, что истинное распределение энергии почти совпадает с тем, которое имеется у несколько более холодного черного тела. Другими словами, при изменении температуры нити распределение энергии изменяется почти так же, как у абсолютно черного тела, но для получения одинакового результата истинная температура нити должна быть выше. Источники света, обладающие таким свойством, иногда называют серыми излучателями.

Вольфрам плавится при 3643° К и при этой температуре имеет характеристики излучения, совпадающие с характеристиками абсолютно черного тела при температуре 3600° К. При любой меньшей температуре вплоть до температур, при которых вольфрам излучает столь мало, что не может считаться источником света, его характеристики хорошо совпадают с распределением энергии абсолютно черного тела при более низких температурах [1]. Поскольку

[1] Близкое совпадение относительных кривых спектрального распределения энергии ламп накаливания с соответствующими кривыми для абсолютно черного тела при некоторой температуре имеет место лишь для видимой части спектра. Степень этого приближения зависит от конструкции тела накала лампы. Наилуч-

в этом диапазоне температур цвет излучаемого света значительно изменяется (от желтого через оранжевый к красному), цветовая температура, т. е. температура абсолютно черного тела, излучение которого визуально совпадает с рассматриваемым, может служить определенным описанием спектрального распределения энергии этого света. Так как температура нити зависит преимущественно от ее размеров и приложенного к ней напряжения, могут быть созданы лампы накаливания, дающие свет в широком диапазоне цветовых температур. В табл. 3.1 приведены данные о цветовой температуре

Таблица 3.1

Значение цветовой температуры для обычных ламп накаливания [1)]

Источник света	Мощность, *вт*	Напряжение, *в*	Цветовая температура, °К
Лампа общего назначения	40	120	2775
	60	120	2805
	100	120	2870
	1000	120	3020
Лампа уличных фонарей:			
6,6 *а*	—	—	2935
20 *а*	—	—	3050
Прожекторная лампа	1000	120	2975
Проекционная лампа № 1	250	115	3425
Обычная лампа цветной фотографии	1000	—	3200
Лампа цветной фотографии	2000	—	3380
Лампа-вспышка № 31	—	6,15	2790
Лампа елочных украшений	—	115	2600

[1)] Forsyth W. E., Adams E. Q., *General Electric Review*, 47, 60—62 (October 1944).

различных ламп накаливания; однако необходимо подчеркнуть, что изменение напряжения сети даже на несколько процентов значительно изменяет приведенные данные. Для того чтобы точно определить спектральное распределение энергии, в любом случае необходимо проводить соответствующие измерения. Изменение напряжения в сети 110 *в* на 5 *в* меняет цветовую температуру лампы с высокой светоотдачей приблизительно на 50° К, в определен-

шее соответствие получается для ламп накаливания со спиральным телом накала, в которых наблюдается «почернение» излучения вследствие многократных отражений.— *Прим. ред.*

ных условиях такое изменение отчетливо различается глазом [1].

Методы измерения цветовых температур заключаются обычно в сравнении по цвету измеряемого света со светом эталонного источника. Непосредственное сравнение сразу же выявляет разницу в цветовой температуре. Источник с более высокой температурой покажется значительно синее сравниваемого, а с более низкой — желтее. В настоящее время выпускаются лампы накаливания, цветовая температура которых при включении в сеть с номинальным напряжением, обозначенным на лампе, близка к 3200° К. С помощью такой лампы, вольтметра и какого-либо устройства для плавной регулировки напряжения можно получить достаточно точный прибор для сравнения цветовых температур [2]. По сравнению с таким источником обычные лампы накаливания кажутся явно желтее, а фотоосветительные лампы — немного синее; солнечный свет при сравнении с лампой накаливания должен казаться более синим, но если он не будет каким-либо способом ослаблен по сравнению со светом лампы, то желтой покажется сама лампа; это явление детальнее будет рассмотрено в гл. VII и XI.

Свеча и спичка

Спектральное распределение энергии пламени свечи или спички (после разгорания) также близко к распределению энергии абсолютно черного тела; цветовая температура пламени свечи составляет около 1800° К, спички — приблизительно столько же или несколько ниже. Наряду с лампами накаливания свеча и спичка являются, однако, почти единственными широко распространенными источниками света, *спектральное распределение* энергии которых точно описывается цветовой температурой. Если в какой-либо статье встречается ссылка на цветовую температуру других источников, единственно правильным будет считать, что она относится *только* к видимому *цвету*, а не к спектральному распределению энергии. Необходимо иметь в виду, что, если два источника имеют одинаковый цвет, это еще не значит, что они имеют одинаковый спектр излучения. Кривые спектрального распределения могут быть

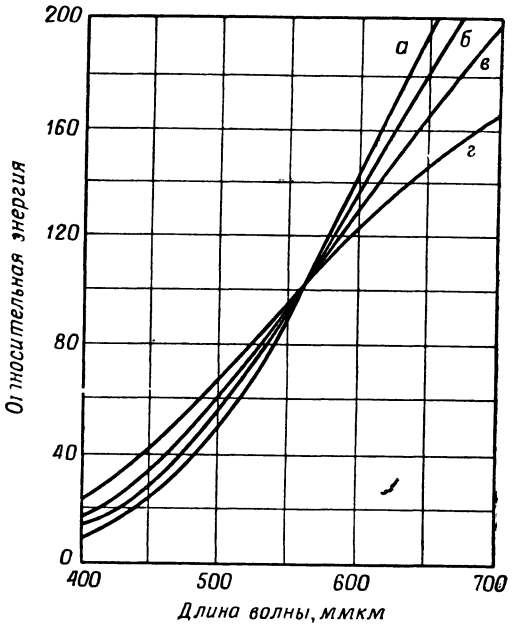
---

[1] В последнее время разработаны новые типы ламп накаливания — кварцевые лампы с йодным циклом, позволяющие получать излучение высоких цветовых температур при достаточно большом сроке службы.— *Прим. ред.*

[2] Для лампы, используемой при измерении цветовой температуры по методу идентификации цвета, должна быть предварительно определена зависимость ее цветовой температуры от напряжения на ней. Такая градуировка производится путем сравнения с эталонными лампами цветовой температуры (см. П. М. Тиходеев, Световые измерения в светотехнике, Госэнергоиздат, 1962).— *Прим. ред.*

разными и все же излучения, им соответствующие, могут быть одинаковыми *по цвету*. Определять распределение энергии при помощи цветовой температуры можно только для излучения, подобного излучению *абсолютно черного тела*.

Для удобства на фиг. 3.6 показаны кривые распределения энергии обычных ламп накаливания в несколько увеличенном масштабе.



Фиг. 3.6. Кривые спектрального распределения энергии некоторых обычных ламп накаливания. [Taylor A. H., G. E. Review, **37**, 411 (1934).]

а — 25 *вт*; *б* — 50 *вт*; *в* — 500 *вт*; *г* — 1000 *вт* (проекционная).

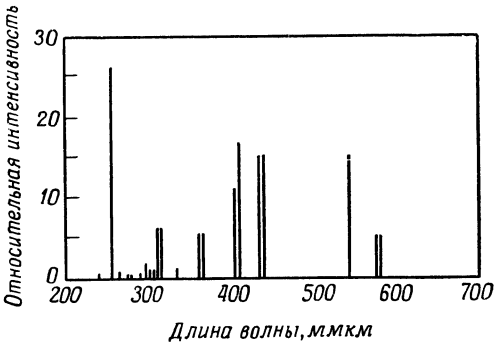
Они условно приведены в точке 560 *ммкм* к одинаковому значению относительной энергии. Увеличение напряжения на любой лампе приведет к повышению относительной энергии для *всех* длин волн, но в коротковолновых участках спектра это повышение будет относительно бóльшим, чем в длинноволновых.

Необходимо учитывать, что все рассуждения, изложенные в данной главе, относятся *только* к свету, непосредственно излучаемому источником и не успевшему еще встретиться с каким-либо предме-

том. Если перед источником находится отражатель (окрашенная стена или что-либо подобное), то свет вблизи источника может обладать спектральным распределением, резко отличающимся от испускаемого им. Это же замечание распространяется и на случай, когда свет должен пройти сквозь любой прозрачный окрашенный материал или стекло.

Люминесцентные лампы

Помимо Солнца и ламп накаливания, существуют другие источники света, которые довольно трудно классифицировать по степени их значимости. Одним из широко известных в настоящее время



Фиг. 3.7. Относительная интенсивность линий, излучаемых ртутной лампой низкого давления. [Barnes B. T., *J. of the Opt. Soc. of America*, 24, 147 (1934).]

источников света являются люминесцентные лампы, значение которых в дальнейшем будет, по-видимому, все возрастать. Если какая-то часть излучения этих ламп и создается за счет тепла, то она весьма мала. Свечение их порождается двумя различными явлениями, одно из которых используется для создания света с помощью другого. Первое основано на свечении паров ртути, наполняющих трубку, из которой предварительно откачан воздух, под действием пропускаемого через эту трубку электрического тока. В отличие от света, который создается за счет теплового излучения, энергия этого свечения сосредоточена в нескольких сравнительно узких участках, или «линиях», спектра. На фиг. 3.7 даны относительная интенсивность и положение этих линий. Однако приведенные интенсивности лишь приблизительные, так как в значительной степени они зависят от конструкции трубки и физических условий ее эксплуатации. Подобные трубки, как и другие источники света,

испускают также энергию невидимых длин волн. На фиг. 3.7 показаны также линии, лежащие в коротковолновой невидимой области спектра (ультрафиолетовой). Как можно увидеть из рисунка, значительное количество энергии излучается в спектральной линии 253,7 *ммкм*.

Второе явление, происходящее в этих лампах, называется люминесценцией. Имеется значительное количество веществ, которые при облучении коротковолновой радиацией испускают видимый свет. При этом необязательно, чтобы падающая энергия непременно находилась в ультрафиолетовой области спектра. Известно много соединений, люминесцирующих под действием видимого света. Однако длина волны испускаемого света всегда больше длины волны света, который вызвал это свечение.

Колбы люминесцентных ламп покрыты изнутри смесью соединений, каждое из которых под действием падающего на его поверхность ультрафиолетового излучения паров ртути испускает свет в различных участках длин волн. Видимый свет люминесцентных ламп состоит, таким образом, из света, испускаемого этими соединениями (люминофорами), и той части видимых линий излучения ртути, которая ими не поглотилась.

В настоящее время выпускается множество подобных ламп с различными кривыми спектрального распределения энергии (фиг. 3.8)[1]. На рисунке прямоугольники над плавными кривыми показывают полное количество энергии, излучаемое линиями ртутного разряда в данной области длин волн [2]. Полная площадь каждого прямоугольника представляет собой относительную энергию линий по сравнению с остальным спектром, а длина волны этих линий может быть определена с помощью фиг. 3.7. Следует отметить, что спектральная кривая лампы дневного света имеет мало общего с энергетическим распределением настоящего дневного света. Название указывает на совпадение *по цвету*, но не по энергетическому распределению.

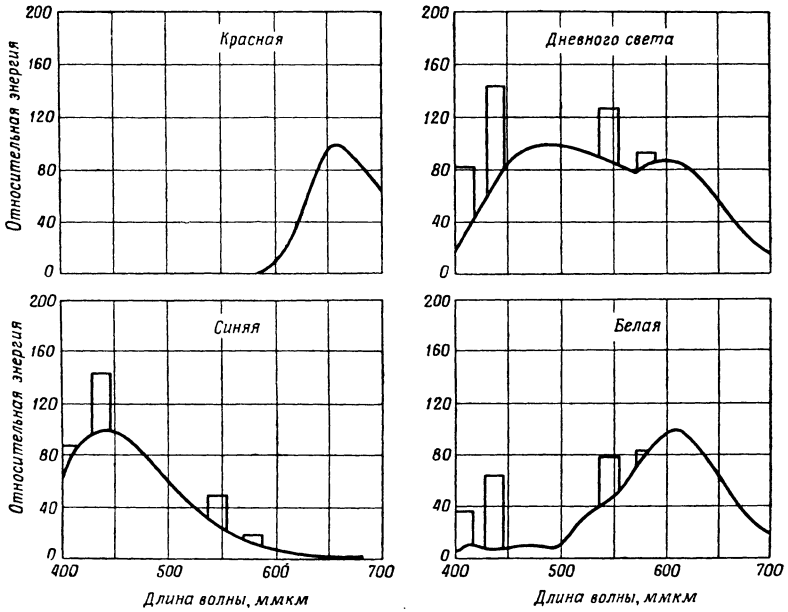
Разработка люминесцентных ламп является важным шагом вперед в развитии искусственного освещения: колбы ламп почти не

---

[1] В СССР в настоящее время выпускаются люминесцентные лампы четырех основных типов: тепло-белого света (ЛТБ; $T_{цв} = 2800°$ К), белого света (ЛБ; $T_{цв} = 3500°$ К), холодно-белого света (ЛХБ; $T_{цв} = 4300°$ К) и дневного света (ЛДС; $T_{цв} = 6500°$ К). Разработаны также лампы последнего типа с улучшенным качеством цветопередачи (ЛЦДС).— *Прим. ред.*

[2] При графическом изображении спектра излучения люминесцентных ламп линии ртутного разряда изображаются обычно в виде прямоугольников, площадь которых пропорциональна относительной мощности излучения линий. Ширина линии при этом условно изображается интервалом длин волн 10 или 20 *ммкм* и не связана, как это ошибочно считает автор, с шириной щели спектрального прибора.— *Прим. ред.*

нагреваются, лампы весьма экономичны и имеют относительно низкую яркость. Специфическое распределение энергии люминесцентных ламп, отличное от дневного света и от ламп накаливания, сказывается на цветопередаче; это необходимо учитывать при оценке люминесцентного освещения. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в гл. XVI. Здесь мы лишь отметим, что две поверхности, при



Фиг. 3.8. Кривые спектрального распределения излучения нескольких типов люминесцентных ламп. [Inman G. E., *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, **34**, 71 (1939).]

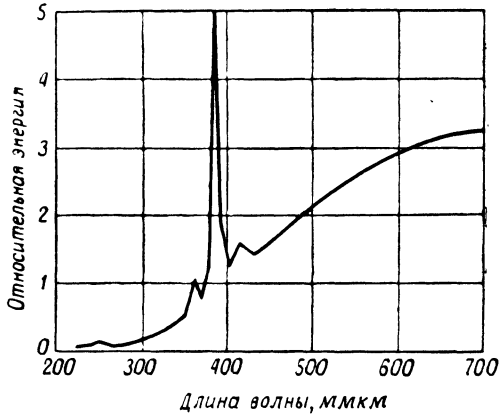
дневном освещении кажущиеся одинаковыми, при освещении другим источником не обязательно будут казаться такого же видимого цвета, если только распределение энергии этого источника не совпадает с распределением энергии дневного света. Таким образом, при освещении предметов подобными источниками возможно изменение их цвета.

Дуговые лампы с угольными электродами

Источником света, широко применяемым в кинопроекционных установках, прожекторах и для ряда других целей, где требуется очень яркий точечный источник, является угольная дуговая лампа.

Если в электрическую сеть включить два угольных электрода (желательно в виде стержней), на мгновение сомкнуть их, а затем слегка раздвинуть, то через воздушный зазор между ними потечет электрический ток.

Излучение, испускаемое подобной электрической дугой в воздухе, обусловливается рядом причин. Бóльшая часть света излу-

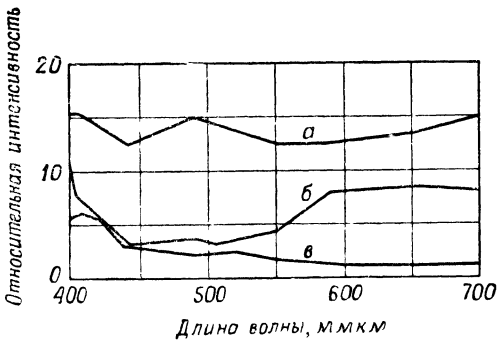


Фиг. 3.9. Спектральное распределение энергии излучения чистой угольной дуги (диаметр углей 6 *мм*) при силе тока около 10*а*. [Mac Pherson H. G., *J. of the Opt. Scc. of America*, **30**, 191 (1940).]

чается обычно концами угольных стержней, нагретыми до очень высокой температуры. Свет этот имеет по существу спектральное распределение абсолютно черного тела. Если в качестве электродов взят чистый уголь, количество света, образующегося за счет сгорания угля в пламени дуги, сравнительно невелико; значительная энергия излучается в виде одиночной полосы в области длин волн 389 *ммкм*. Эта так называемая циановая полоса, как предполагают, создается в результате возбуждения циана, образующегося при температуре дуги за счет соединения углерода с азотом воздуха. Распределение энергии 10-амперной дуги, горящей в воздухе между стержнями из чистого угля, показано на фиг. 3.9.

Можно изменить распределение энергии подобных дуг, если вместо электродов из чистого угля использовать стержни с сердцевиной (фитилем) из других веществ, которые могут быть выбраны так, чтобы создаваемое дугой пламя имело любой желаемый цвет и было значительно ярче светящегося конца стержня. Соответствующий выбор материала для фитиля позволяет получать дуги,

дающие по существу белый свет; так создаются дуги «белого пламени» и «высокой интенсивности», применяемые главным образом в киноустановках и прожекторах. Интенсивность и распределение энергии таких дуг сложным образом зависят от размера электродов, материала фитилей, расстояния между электродами, силы тока и других факторов. Спектральное распределение энергии излучения нескольких видов дуг показано на фиг. 3.10.



Ф и г. 3.10. Кривые спектрального распределения излучения для трех дуг, создаваемых углями с разными фитилями. [K a l b W. C., *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, **53**, 1174 (1934).]

а — из солей редких земель, в частности церия; *б* — из соединений стронция; *в* — из соединений железа, никеля и алюминия.

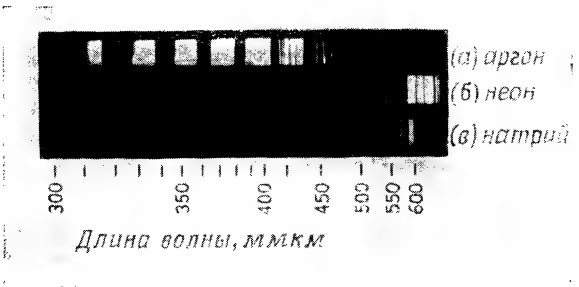
Очевидно, эти распределения энергии весьма далеки от распределений, присущих абсолютно черному телу, и могут влиять на освещаемые цветные предметы совершенно иначе, чем дневной свет или лампы накаливания тех же цветов.

Газоразрядные трубки

Многие современные источники света работают по тому же принципу, что и трубки с парами ртути, являющиеся основой люминесцентных ламп; в обиходе они известны как неоновые трубки. Почти любое газообразное вещество испускает свет, если поместить его в откачанную трубку, через которую протекает электрический ток. Каждый газ испускает свой свет, и различные распределения энергии обеспечивают широкую гамму цветов. Почти всегда энергия излучается в виде линий определенных длин волн, и, хотя в некоторых областях спектра имеется много близко расположенных линий, редко встречается область, в которой свет обла-

дает непрерывным, а не линейчатым спектром. Спектры двух таких газов показаны на фиг. 3.11.

Чаще всего такие трубки, заполненные инертными газами, используются для обычной световой рекламы. Трубки, выполняе-



Ф и г. 3.11. Спектрограммы.

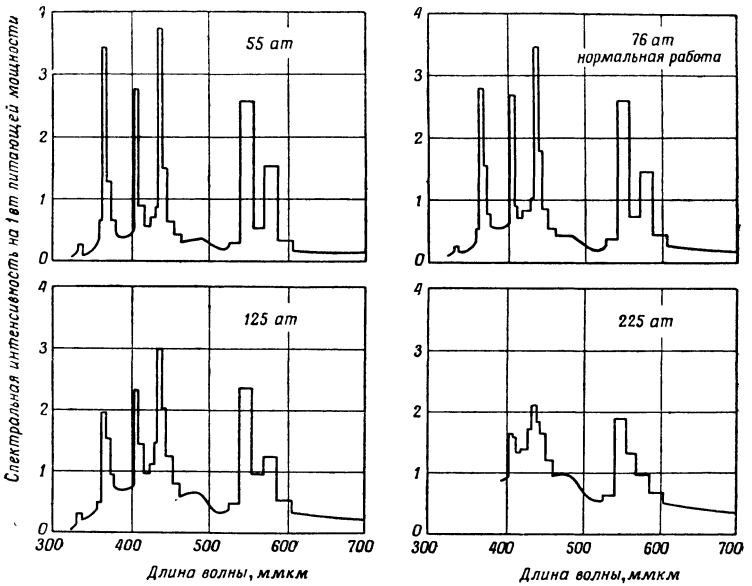
а — аргоновой лампы тлеющего разряда; *б* — неоновой лампы тлеющего разряда; *в* — натриевой лабораторной дуги.

Ф и г. 3.12. Спектрограммы.

а — кварцевой ртутной дуги низкого давления; *б* и *в* — ртутной кварцевой и стеклянной трубок тлеющего разряда типа АН-6 (высокое давление). Различие между *б* и *в* обусловлено различным поглощением ультрафиолетового излучения стеклом и кварцем.

мые по такому же принципу, стали важными источниками света и для других целей. В одних трубках, нашедших широкое применение для уличного освещения, используются пары натрия. Его энергия почти полностью сосредоточена в двух желтых линиях 589 *ммкм*. Спектр натриевой лампы показан на фиг. 3.11,*в*.

Трубки другого типа работают при исключительно высоком давлении паров ртути, в результате которого значительно увеличивается яркость испускаемого света и одновременно добавляется к линейчатому спектру ртути значительное количество света с непрерывным распределением энергии по длинам волн. Фотографии



Ф и г. 3.13. Кривые спектрального распределения ртутной дуги, показывающие увеличение количества непрерывного излучения и уширение линий с повышением давления. [Forsythe W. E., *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, **35**, 140 (1940).]

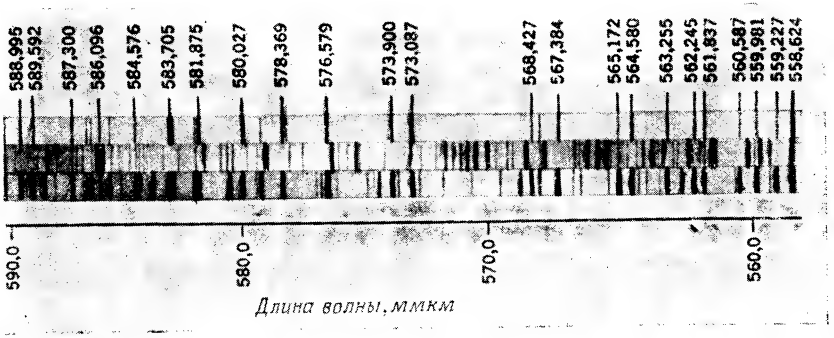
трех спектров подобных источников света показаны на фиг. 3.12, а спектральное распределение энергии при различном давлении паров ртути — на фиг. 3.13. Благодаря высокой яркости такие источники имеют большое практическое применение. Обычно они светятся характерным синевато-белым цветом [1].

---

[1] Помимо указанных автором неоновых, натриевых и ртутных ламп различного давления, для целей освещения в настоящее время выпускаются также ртутные лампы с исправленной цветностью излучения, колбы которых покрыты специальным люминофором, компенсирующим недостаток красного излучения в ртутном разряде. Для освещения улиц и площадей используются также мощные (20 *квт*) ксеноновые лампы, дающие спектр излучения, близкий к солнечному. См. «Справочная книга по светотехнике», т. I, Изд-во АН СССР, 1956.— *Прим. ред.*

Железная дуга

Источником света, не имеющим практического применения для освещения, но представляющим значительный научный интерес ввиду сложности своего спектра, длины волн всех тысяч линий которого были определены с большой точностью, является дуга, образующаяся в воздухе между двумя электродами из чистого железа.



Ф и г. 3.14. Спектрограмма участка спектров европия и железа.

Спектр европия заключен между двумя спектрами железа, что позволяет точно сравнить длины волн европия с известными длинами волн железа.

Фотография такого спектра на ограниченном участке длин волн показана на фиг. 3.14 рядом со спектром элемента европия, длины волн которого можно определить, сопоставляя их с измеренными линиями железа. Спектр железа довольно часто применяется как для юстировки положения спектра в спектроскопе, так и для отождествления линий, создаваемых неизвестным соединением.

Все рассмотренные до сих пор источники света при неизменных условиях излучали свет одинакового качества и постоянной интенсивности. Дуговые лампы чрезвычайно чувствительны к изменениям внешних условий, а их интенсивность непрерывно изменяется («мерцание»).

Точечная дуговая лампа

Другим очень интересным дуговым источником света является разработанная лабораторией «Вестерн юнион телеграф компани» точечная дуговая лампа. Она состоит из двух электродов специальной конструкции, помещенных внутри стеклянной колбы, подобной колбе обычной радиолампы, наполненной инертным газом аргоном примерно при атмосферном давлении. Первоначально для

образования дуги между электродами пропускают большой ток, затем горение продолжается уже при меньшем токе. Испускаемый при этом свет имеет в видимой области непрерывный спектр (он лишь слегка загрязнен линиями аргона и циркония, принадлежащими одному из электродов) со значительно большим линейчатым излучением в инфракрасной области. Близость подобной лампы к точечному источнику, сочетающаяся с хорошим качеством света, обещает ей широкое применение.

Лампы-вспышки

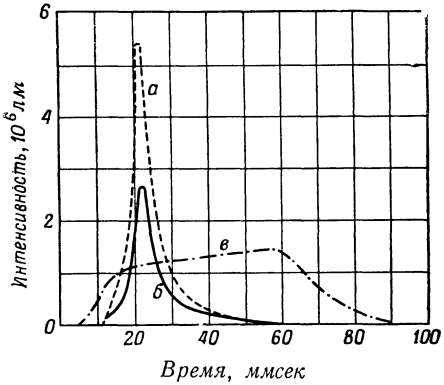
Существует несколько типов источников света, представляющих интерес главным образом для фотографов и предназначенных для создания определенного *количества* света за весьма короткий промежуток времени. Такими источниками являются так называемые лампы-вспышки различных типов. Исторически самыми первыми, но все еще изредка имеющими применение, являются сгорающие порошки. Это — легко воспламеняющиеся смеси, содержащие соединение (обычно металлический магний), которое при сгорании излучает яркий свет. Интенсивность излучения определяется количеством сжигаемого порошка, время сгорания которого составляет около 0,1 *сек*. Продуктом сгорания является густой белый дым, представляющий собой окись магния. Типичная кривая распределения энергии для таких порошков подобна кривой распределения абсолютно черного тела при температуре около 4000° К; цвет их пламени можно изменять путем добавления солей металлов.

Более современными и менее опасными в обращении являются лампы-фотовспышки. Эти лампы широко применяются в фотографии и выпускаются специализированной отраслью промышленности. Имеются лампы с различной скоростью сгорания, позволяющие сосредоточить огромную энергию в кратковременной вспышке или же растянуть вспышку на промежуток времени, достаточный для прохождения перед фотопленкой затвора. На фиг. 3.15 приведены кривые, показывающие относительную интенсивность некоторых типов подобных ламп в различные моменты после начала вспышки.

Поскольку подобные лампы изготовляются из различных материалов, невозможно сделать какое-либо общее заключение относительно создаваемого ими распределения энергии. Можно лишь указать, что почти все лампы, изготовляемые для цветной фотографии, создают распределение, эквивалентное лампам накаливания с цветовой температурой около 3500° К. Существуют также лампы с голубым наружным покрытием, которые действуют на цветную пленку так же, как дневной свет. Их можно использовать при дневном освещении для подсветки глубоких теней и т. п. Кривая распределения энергии для лампы без покрытия приведена

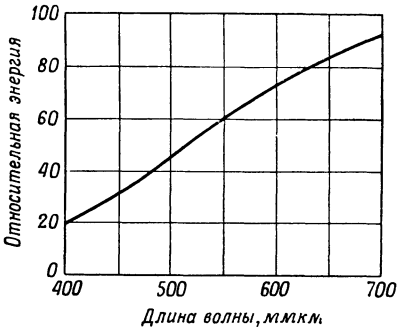
на фиг. 3.16. Наименьшая длительность вспышки лампы такого типа порядка 0,02 *сек*.

Новый источник света, изобретенный Эджертоном и Джермесхаузеном (Массачусетский технологический институт), способен создавать яркие вспышки длительностью порядка 1/30 000 *сек*. Эта лампа была разработана компанией «Истмэн Кодак» для целей фо-



Фиг. 3.15. Кривые, показывающие изменение светового потока трех типов ламп-вспышек за время горения.

а — G. E. № 20; *б* — G. E. № 10; *в* — G. E. № 31.



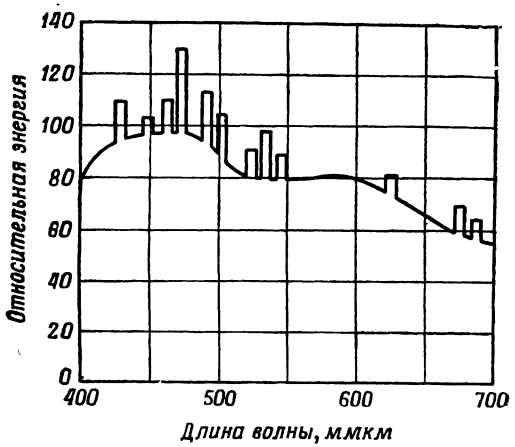
Фиг. 3.16. Относительное спектральное распределение энергии излучения лампы-вспышки № 20. [Forsythe W. E., Denison University Bulletin, *J. of the Scientific Laboratory*, **30**, 113 (1935).]

тографии и выпущена под маркой «Кодатрон». Принцип действия ее такой же, что и газоразрядных ламп с парами ртути или неоном, но вместо непрерывного пропускания тока через газ здесь происходит мгновенная разрядка запасенной в конденсаторе электрической энергии. Современные лампы наполняются не одним газом, а смесью их, благодаря чему испускаемый ими свет подобен дневному [1].

Кривая, иллюстрирующая приблизительное распределение энергии лампы «Кодатрон II», приведена на фиг. 3.17. Поскольку распределение энергии достаточно близко к дневному свету, эту лампу можно применять с пленкой, предназначенной для цветной съемки при дневном освещении.

---

[1] В настоящее время промышленностью выпускаются различные типы импульсных ламп, используемых для мгновенной фотографии, стробоскопии, сигнализации и других целей. Возможны импульсные лампы с длительностью вспышки значительно короче чем 30 *мксек*. В лампах используется разряд в ксеноне.— *Прим. ред.*



Ф и г. 3.17. Кривая спектрального распределения излучения лампы «Кодатрон II».

Другие источники света

Небезынтересно остановиться на природе разнообразных источников света. Звезды испускают свет благодаря своим высоким температурам, которые настолько различны, что цвет испускаемого звездами света приобретает важное значение для астрономов. Луна представляет собой просто серое тело, освещенное солнцем, но сама света не испускает. Цвет лунного света по существу совпадает с цветом солнечного излучения.

Значительное количество света испускается при смешивании растворов определенных химических реактивов. Явление это известно как хемилюминесценция; испускаемый при этом свет перекрывает широкую гамму цветов, интенсивность которых достаточна, чтобы их можно было легко сфотографировать.

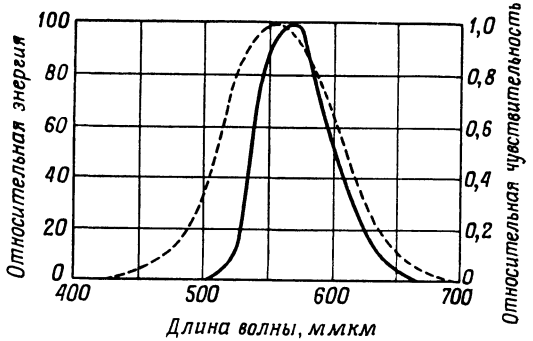
Свет испускается при трении некоторых материалов или при их резком ударе о металл; первое явление называется триболюминесценцией, второе — искрением.

Многие соединения при внесении их в почти бесцветное пламя окрашивают его. Возникающий при этом цвет служит для химика важным указанием на природу неизвестного соединения. Например, чистый натрий и его соединения окрашивают пламя в желтый цвет.

Тесно связано с люминесценцией явление, часто называемое фосфоресценцией, хотя, строго говоря, термин этот относится к со-

вершенно иному явлению. Фосфоресцирующие соединения обладают свойством непрерывно испускать свет в течение длительного времени после того, как их осветили другим источником. Они используются для световых знаков, светящихся некоторое время в темноте, но постепенно меркнущих.

Термин «фосфоресценция», строго говоря, относится к случаю, когда свет испускается фосфором или аналогичными веществами,



Ф и г. 3.18. Относительная спектральная чувствительность человеческого глаза (пунктирная кривая) по сравнению со спектральным распределением энергии света светлячка (сплошная кривая). [Данные о светлячке по I v e s H. E., C o b l e n t z W. W., *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, **4**, 657 (1909).]

медленно окисляющимися на воздухе. По существу такой процесс является медленным горением. Временами фосфоресценцию можно наблюдать на поверхности морских и океанских вод, особенно в тропиках, где свечение происходит в результате окисления мельчайших морских организмов.

Многие вещества обладают способностью люминесцировать под действием рентгеновских лучей или радиоактивного излучения.

Последним и, по-видимому, наиболее слабым, но весьма интересным с научной точки зрения является свет, излучаемый светлячком. Причина его неизвестна, и человек еще не создал источник света с подобным распределением энергии (разумеется, такой свет может быть получен косвенным путем с помощью фильтров). Особенность испускаемого светлячком света состоит в том, что он полностью ограничен видимой частью спектра. Вне этой области энергия не излучается, а максимум ее почти точно совпадает с длиной

волны, к которой наиболее чувствителен глаз. Кривая спектрального распределения излучаемой светлячком энергии очень похожа на кривую чувствительности человеческого глаза; обе кривые приведены на фиг. 3.18 [1].

[1] Описанные автором источники света следует дополнить разработанными в последнее время электролюминесцентными и радиоактивными источниками света. Источники первого типа используют свечение люминофоров, нанесенных на специальное проводящее стекло, под действием переменного электрического поля. В радиоактивных источниках излучение создается люминофорами, нанесенными на колбу ламп, под действием тех или иных радиоактивных изотопов, помещенных внутри колбы. Светоотдача и яркость этих новых источников невелики, в связи с чем в настоящее время они используются преимущественно для целей сигнализации, связи и т. п.— *Прим. ред.*

ГЛАВА IV

Освещение

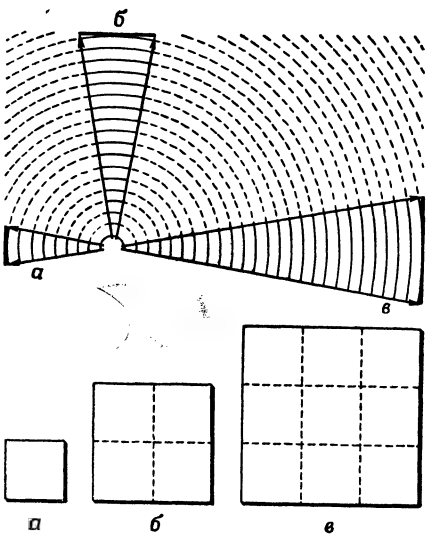
До сих пор мы принимали, что свет возникает в точке и распространяется прямолинейно с постоянной скоростью. Таким образом, свет, излучаемый источником в данный момент, распространяется в пространстве как расширяющаяся сферическая поверхность. Это, бесспорно, основная особенность распространения света, но столь же очевидно, что практически почти не существует источников света, столь малых, чтобы их можно было считать действительно точечными. Почти во всех случаях из-за конечного размера источников света их следует рассматривать как совокупность множества точечных источников, расположенных рядом и образующих некоторую поверхность. Каждая точка этой поверхности излучает свет так же, как если бы она была одна, но суммарное действие всех этих источников во многих случаях отличается настолько, что целесообразно установить новые правила для определения действия излучающих свет поверхностей.

Точечные источники

Основным правилом, которым определяется действие точечного источника света, является так называемый закон обратных квадратов, проиллюстрированный диаграммой фиг. 4.1. *Количество* света, падающего на данную поверхность, зависит от расстояния между источником и этой поверхностью. Так как *весь* свет, излучаемый точечным источником, распределен по поверхности сферы, то доля всего излучения, попадающая на данный участок, зависит от отношения площади этого участка к площади сферы, частью которой он является. Если эту зависимость представить математически, то получим, что освещенность участка уменьшается пропорционально квадрату расстояния от источника света, т. е. если на расстоянии 2 *м* от источника света мы имеем некоторую освещенность, то на расстоянии 4 *м* эта освещенность уже будет равна $(2/4)^2 = 4/16 = 1/4$ данной освещенности.

Такая зависимость обусловлена тем, что площадь сферической поверхности увеличивается пропорционально квадрату радиуса сферы и, следовательно, количество света, попадающего на *данный*

участок, уменьшается таким же образом. Как указывалось выше, это основной закон освещения. Применение этого закона показывает, что для точечного источника света при увеличении расстояния от источника света должно наблюдаться *очень быстрое уменьшение* освещенности. Освещенность от реальных источников света при увеличении расстояния всегда уменьшается *более медленно*.



Ф и г. 4.1. Диаграмма, иллюстрирующая закон обратных квадратов при различных расстояниях от источника света.

Участки *а*, *б* и *в* показывают площади, по которым должно быть распределено одинаковое количество света на расстоянии соответственно одной, двух и трех единиц длины от источника света.

Прежде чем рассматривать этот вопрос более детально и выводить правила для определения освещенности от различных источников света, необходимо рассмотреть терминологию, применяемую в светотехнике.

Терминология

Существуют шесть основных разделов терминологии, которые следует рассмотреть при обсуждении действия источников света. Рассмотренные в гл. I три группы следует удвоить, так как указанное деление на три группы может относиться как к самим источникам света, так и к поверхностям, которые освещаются этими источниками. В этих двух случаях необходимо пользоваться различными понятиями, поэтому следует применять и различную терминологию. При первом ознакомлении с таким большим числом терминов у читателя может возникнуть путаница, но если с самого начала попытаться четко разграничить термины, относящиеся к источнику света и к его действию, то их можно легко различать. Третью группу терминов используют в тех случаях, когда принимают во внимание то обстоятельство, что свет, *падающий* на поверхность, отличается от света, *испускаемого* ею, но эта особенность будет рассмотрена ниже.

Как известно, существуют три основных раздела в науке о цвете — физика, психофизика и психология. Применительно к источнику света или его действию они позволяют определить: количество и качество излучаемой энергии (на единицу площади для каж-

дой длины волны в рассматриваемом направлении); действие этой излучаемой энергии, определенное на основе стандартизированных данных о характеристиках глаза; психологическое действие на реального наблюдателя в определенных условиях. В данном случае мы рассмотрим только вопрос об интенсивности света, а вопросы, касающиеся качественной стороны и цвета освещения, будут рассмотрены в последующих главах.

Свет, распространяющийся в пространстве, называют световым потоком. Излучаемую энергию называют потоком излучения; при оценке ее по отношению к глазу пользуются термином «световой поток»; световую энергию после того, как она попадает в орган зрения человека, называют яркостью.

При использовании каждого из этих терминов следует указывать, к чему он относится: к источнику света, к свету, падающему на объект, или к свету, идущему от объекта. Все это представлено в виде табл. 4.1 и будет рассмотрено ниже более подробно.

Таблица 4.1

Физические, психофизические и психологические термины, используемые при описании световых явлений

	Физика	Психофизика	Психология
Источник	Поток радиации	Световой поток	—
Излучение, падающее на поверхность	Энергетическая яркость	Яркость	Светлота источника
	Облученность	Освещенность	« «
Отраженное излучение	Энергетическая отражающая способность	Световая отражающая способность	Светлота поверхности
			Видимая яркость поверхности
Пропущенное излучение	Энергетическая пропускающая способность	Световая пропускающая способность	Светлота пропускающей свет поверхности

Как легко заметить, табл. 4.1 представляет собой слегка видоизмененный вариант терминологии по колориметрии Американского оптического общества, приведенной в конце гл. I.

Физические характеристики света, воздействующего на глаз из определенного пространственного объема, могут отличаться от характеристик света, получаемого с поверхности только пространственным его распределением. Два термина—«светлота поверхности»

й «видимая яркость поверхности» — не синонимы. Подробно об этом будет сказано в гл. X. Рассмотрим основные термины, используемые в книге. Все физические термины являются производными слов «излучение», «радиация», психофизические — от слова «световой», во всех психологических терминах используется слово «светлота», за исключением одного случая, когда различаются две отдельные фазы, которые должны быть обозначены как «светлота» и «видимая яркость». Более подробное изложение этого вопроса читатель может найти в отчете Комитета по колориметрии [1]. Наиболее часто встречающееся в книге слово, смысл которого можно понять неправильно, это «светлота». В прошлом это слово, подобно слову «цвет», использовалось во всевозможных значениях. Использование его только для обозначения психологической реакции человека является совершенно необходимым упрощением, введенным Комитетом по колориметрии. В данной книге во всех случаях, когда используется это слово, оно обозначает *только* зрительную оценку света *реальным* наблюдателем.

Здесь же следует упомянуть о двух других терминах, хотя о них еще будет сказано подробнее. Первый термин — «блесткость». В ранее опубликованной литературе этот термин употреблялся в том же значении, в каком теперь употребляется слово «светлота», т. е. в психологическом смысле. В данной книге термином «блесткость» обозначают контраст наблюдаемой сцены как целого или контраст части сцены по отношению к целому. Он соответствует понятию, обратному понятию «блеклость», тогда как слово «светлота» обозначает понятие, обратное понятию «темнота».

Широко используется в книге также слово «эффективный», обычно в сочетании почти со всеми другими упомянутыми выше словами. Психофизическая терминология, приведенная выше, подразумевает в качестве приемника света глаз человека. Под словом «эффективный» подразумевается *действие* света в любом возможном аспекте. Оно используется обычно при обозначении действия излучения на любые приемники, в том числе на глаз человека. Таким образом, в тех случаях, когда желательно разграничить определения света как такового и определения действия света на тот или иной приемник, следует использовать это слово.

Мы рассмотрели ряд понятий, связанных со светом и его действиями. Однако наличия одних только понятий недостаточно. Необходимо, чтобы понятия базировались на соответствующих измерениях, а эти измерения должны быть определенным образом связаны со стандартизированными и общеизвестными методами измерений, принятыми в других областях науки.

---

[1] См. *J. of the Opt. Soc. of America*, 33, 552 (1943).

Единицы измерений

Основными измерениями *в физике* являются измерения количества энергии; *в психофизике* — количественные измерения воздействия этой энергии на глаз наблюдателя, рассматриваемый как стандартный приемник; *в психологии* (конечно, обязательно в зависимости от принятых философских принципов) — измерения эффективности по отношению к другим восприятиям. При выполнении всех этих измерений только для определения количества энергии при заданной длине волны имеется строго определенная и общепринятая основная единица измерения, называемая эргом (обозначение — *эрг*).

В области психофизики в разное время использовались различные единицы. Они были стандартизированы в отчете Комитета по колориметрии и будут использоваться в настоящей книге. Здесь основной единицей является люмен (*лм*). В области психологии нет определенных единиц, и в прошлом при анализе результатов наблюдений обычно применялись термины «больше», «меньше» или «одинаково» по отношению к какой-либо другой эталонной величине. Эрг — очень малая единица измерения, определяемая количеством энергии, необходимой для выполнения определенной небольшой работы. Чтобы поднять 1 *г* любого вещества на 1 *см*, необходимо затратить 980 *эрг*. Рассматривать эти единицы здесь более подробно нет необходимости. Интересующиеся могут обратиться к любому курсу общей физики. Важно лишь понять то, что энергия — это способность производить работу, а эрг — строго определенное количество такой энергии.

Так как эта единица очень мала, была введена другая, значительно бóльшая единица, называемая джоулем (*дж*); 1 *дж* = 10^7 *эрг*. Единицей мощности является ватт (*вт*); 1 *вт* мощности соответствует выделению энергии в количестве 1 *дж/сек*. Мощность источника света в ваттах, следовательно, определяет его энергию в джоулях в 1 *сек*; если по этим данным производятся вычисления, то слéдует учитывать только излучаемую энергию. Потребляемая энергия всегда равна или больше излучаемой энергии; два этих понятия связаны коэффициентом полезного действия источника света.

В психофизике основной единицей измерения по смыслу должна бы являться производная от физической единицы, но то обстоятельство, что она является именно производной, несколько завуалировано. Стандартной единицей измерения является люмен — световой поток точечного источника света силой в 1 *св*, падающий на 1 $м^2$ сферической поверхности экрана радиусом 1 *м*. На основе предшествующих рассуждений легко понять, что эта величина зависит не только от количества энергии, излучаемой стандартной

свечой, но и от спектрального распределения энергии, а также от кривой спектральной чувствительности глаза[1]. Важная характеристика источника света — его светоотдача, определяемая числом люменов, полученных на 1 *вт* излучаемой (или подводимой) энергии. Другие общепринятые единицы будут рассматриваться по ходу изложения материала.

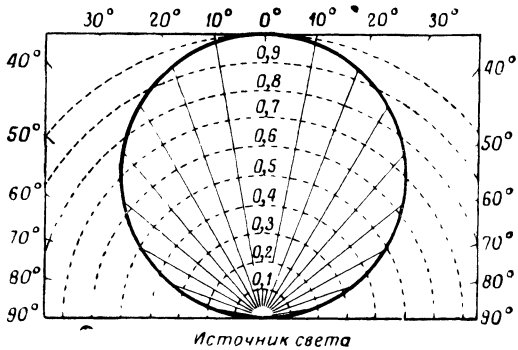
Источники света с большой площадью

Теперь рассмотрим вкратце излучение света реальными источниками, площадь которых настолько велика, что их нельзя считать точечными. Как уже указывалось, точечные источники света создают освещенность, которая уменьшается пропорционально квадрату расстояния от них.

Когда источник света больше точечного, каждую точку его площади можно рассматривать как самостоятельный источник света и эффект, полученный на некотором расстоянии от источника света, является суммарным эффектом всех точек. Для наглядности проще начать с рассмотрения крайнего случая, когда источником света является чрезвычайно большая (бесконечная) плоская поверхность, равномерно излучающая свет по всей своей площади. Освещенность, полученная на данной небольшой поверхности от очень большого плоского источника света, *не зависит* от расстояния. Очевидно, что все источники света, которые слишком велики, чтобы их можно было рассматривать как точечные, по своим свойствам находятся между плоским и точечным источниками. Если источник света имеет, скажем, форму квадрата со стороной 10 *см*, то освещенность, создаваемая этим источником, будет уменьшаться медленнее, чем следует ожидать по закону обратных квадратов, до тех пор, пока расстояние от источника света не окажется достаточно большим по сравнению с размерами источника; после этого освещенность вполне точно определяется упомянутым законом. Это можно считать общим свойством всех источников света (за исключением источников света с рефлекторами). Когда освещаемая площадь параллель-

[1] Световой поток монохроматического излучения может быть получен путем умножения мощности излучения на световой эквивалент, равный 683 *лм/вт*, и на относительную видность глаза. В случае сложного излучения световой поток может быть рассчитан суммированием его монохроматических составляющих. Таким образом, световой поток является в соответствии с терминологией, используемой автором, психофизической величиной, которой соответствует физическая величина — мощность излучения (или лучистый поток). Световой поток характеризует суммарное излучение источника света во всех направлениях и поэтому не может непосредственно восприниматься глазом. Поэтому психологический аналог его в табл. 1.1 отсутствует. *Световое ощущение — светлота* — связана с психофизическим термином — *яркость* и физическим термином — *энергетическая яркость*.— *Прим. ред.*

на источнику света, то освещенность ее при изменении расстояния от источника изменяется медленно до тех пор, пока это расстояние меньше размера источника света; затем по мере увеличения расстояния освещенность меняется более быстро, и когда наконец расстояние станет достаточно большим (в 10 или более



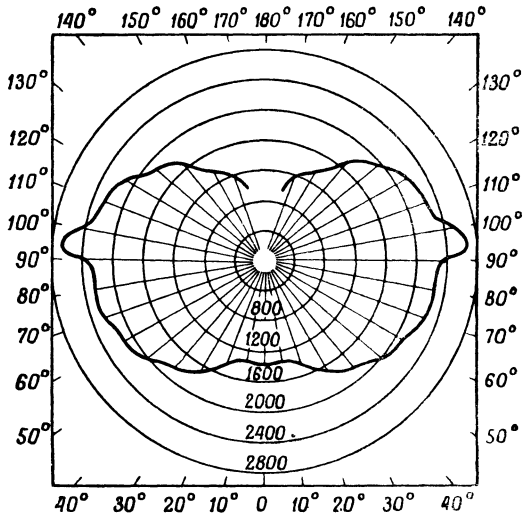
Ф и г. 4.2. График относительных интенсивностей света от небольшого диффузного источника света с плоской поверхностью.

Относительная интенсивность пропорциональна длине линий, отходящих от источника света.

раз превышающим размер источника света), освещенность будет определяться законом обратных квадратов.

Предположим теперь, что плоский источник света расположен под углом к освещаемой поверхности. Очевидно, что на эту поверхность все же попадает свет от всех точек источника, но этот свет будет распространяться под углом к источнику, а не перпендикулярно к нему. Экспериментально установлено, что при таких условиях для многих источников света его количество, попадающее на освещаемую поверхность, уменьшается приблизительно пропорционально уменьшению размера источника света, наблюдаемого под этим углом. Это так называемый закон косинусов, согласно которому количество света уменьшается пропорционально косинусу угла между перпендикуляром к поверхности источника света и данным направлением. Если интенсивность света в различных направлениях от такого источника представить графически таким образом, чтобы расстояние точки от начала отсчета показывало относительные интенсивности света при различных углах наблюдения, то получим график, подобный показанному на фиг. 4.2.

Однако если источник света представляет собой правильную сферу, интенсивности, очевидно, будут одинаковыми во всех направлениях. Для большинства реальных источников интенсивность зависит от угла наблюдения, поэтому следует строить кривые распределения интенсивностей источника света в различных направ-



Фиг. 4.3. Кривая в полярных координатах, показывающая относительные интенсивности света от газонаполненной лампы (без рефлектора) мощностью 1500 *вт*. [Sylvester C., Ritchie T. E., *Modern Electrical Illumination*, 181 (1927).]

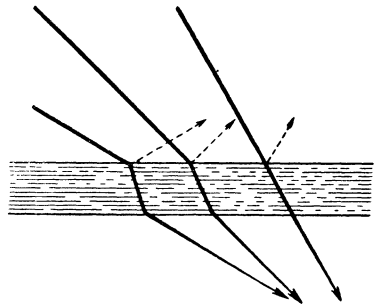
лениях. График для реального источника света (без рефлектора) показан на фиг. 4.3. Угловое распределение излучения можно изменять по желанию, используя рефлекторы или другие оптические приборы, например линзы.

Теперь полезно рассмотреть, как изменяется направление пучка света, если на его пути поместить какой-либо предмет. В этом случае свет испытывает только одно из трех изменений: поглощается предметом, пропускается им, отражается от него. В первом случае свет превращается в другой вид энергии, обычно в тепло. Во втором происходит изменение направления света по строго определенным законам, известным как законы преломления света. В третьем случае происходит изменение направления света согласно законам отражения. Интенсивность отраженного и пропущен-

ного излучений во всех этих случаях зависит как от природы поверхности, так и от свойств света. Все три явления представляют собой основу самостоятельных разделов оптики, и их детальное рассмотрение не входит в задачи данной книги. Здесь используются некоторые простые законы оптики. Преломление и отражение света будут рассмотрены в настоящей главе. Поглощение света — это основное явление, определяющее цвет объекта, и поэтому оно будет рассмотрено нами отдельно.

Преломление света

Предположим, что свет от небольшого источника расположенного на некотором расстоянии, падает на прозрачную среду, например на гладкий кусок стекла. Стекло представляет собой твердый материал, обладающий способностью пропускать свет. Этот материал имеет две поверхности. Если эти две поверхности параллельны одна другой, как, например, у оконного стекла, путь света будет таким, как показано на фиг. 4.4.

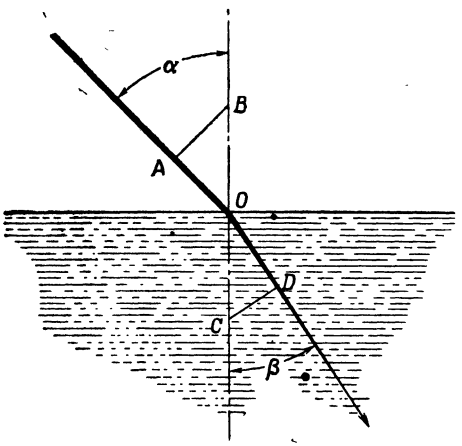


Ф и г. 4.4. Путь световых лучей через плоско-параллельную стеклянную пластинку.

Лучи света, попадая на одну из поверхностей, изменяют свое направление, проходят сквозь стекло и при выходе из него в воздух снова изменяют направление таким образом, что лучи распространяются *параллельно своему первоначальному направлению*, но несколько смещаются в сторону. Степень смещения зависит главным образом от толщины стекла. На фиг. 4.4 показаны два основных принципа, которые применимы во всех случаях, когда свет переходит из одной среды в другую: 1) при пересечении границы между двумя средами (за исключением случая, когда свет падает перпендикулярно) направление света изменяется; 2) отклонение света при выходе его из второй среды опять в первую всегда по величине точно такое же, как и при входе во вторую среду, но имеет противоположное направление.

Второй принцип важен потому, что на практике наиболее обычным является такой случай, когда прозрачный предмет находится в воздухе. Первый принцип подчиняется строго определенным правилам, которые можно сформулировать следующим образом. Свет, проходящий через гладкую границу двух поверхностей

при данном угле наклона *из* воздуха в вещество с большим показателем преломления, всегда отклоняется по направлению к перпендикуляру к поверхности; свет, выходящий через поверхность вещества опять в воздух, всегда на столько же отклоняется от перпендикуляра. Степень отклонения зависит от свойств прозрачного вещества, от угла падения света и от длины его волны.



Ф и г. 4.5. Луч света, проходящий из воздуха в среду с бо́льшим показателем преломления.

В более определенном количественном изложении эти правила таковы:

1. Степень отклонения света на поверхности зависит от особого свойства материала — от так называемого показателя преломления, представляющего собой отношение скорости света в вакууме к скорости света в рассматриваемой среде. Показатель преломления воздуха составляет 1,000296; почти для всех практических целей его можно принять равным показателю преломления вакуума, или единице. В табл. 4.2 приведены показатели преломления для различных веществ. Заметим, что показатель преломления обычного стекла колеблется от 1,3 до 1,6, а показатель преломления оптического стекла — от 1,5 до 2,0.

2. Степень отклонения показана на фиг. 4.5. Если расстояние OB равно расстоянию OC, то отношение AB к CD равно показателю преломления. Если показатель преломления обозначить через n, то математически эту зависимость можно представить в виде

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n,$$

где α — угол падения и β — угол преломления. Если свет падает на поверхность перпендикулярно, то AB, CD, α и β равны нулю и свет проходит сквозь предмет, не изменяя своего направления, но скорость его при этом несколько уменьшается. Чем больше угол падения луча, т. е. чем он ближе к направлению, параллельному направлению поверхности, тем больше отклонение света при прохождении через прозрачное тело.

Таблица 4.2

Показатели преломления различных веществ для *D*-линии спектра натрия

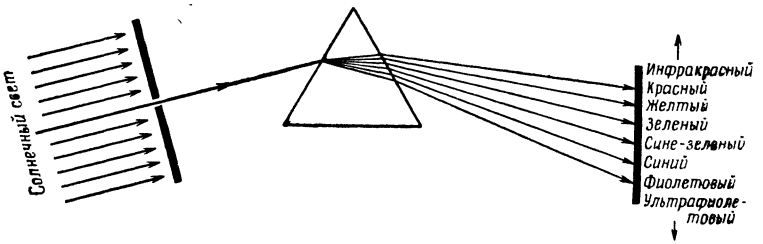
Вещество	Показатель преломления
Оптическое стекло Jena O 225	1,5159
Оптическое стекло (флинт) Jena O 602	1,5676
Оптическое стекло (тяжелыйфлинт) Jena O 41	1,7174
Наиболее тяжелый флинт Jena S 57	1,9626
Каменная соль	1,553399
Флюорит	1,43393
Опал	1,406—1,440
Канадский бальзам	1,530
Желатина	1,530
Бензол	1,5012
Этиловый спирт	1,3695
Вода	1,3312

3. Степень отклонения света зависит от длины волны излучения и от природы материала. Такое явление называют *оптической дисперсией*. Как правило, свет с меньшей длиной волны отклоняется *больше*, чем свет с большей длиной волны, но для некоторых материалов это правило не справедливо. Про такие материалы говорят, что они имеют *аномальную дисперсию*.

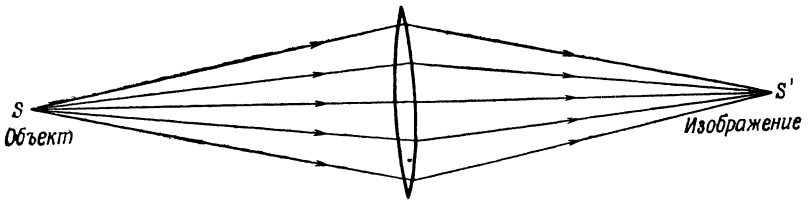
4. Если гладкие поверхности тела не параллельны одна другой, как, например, у призмы, то направление света при выходе из нее в воздух не параллельно направлению падения. Направление выходящего из призмы луча можно определить, пользуясь законом, сформулированным в п. 2. Так как направление выходящего света зависит от длины волны, излучение различных длин волн разделяется и из узкого пучка света образуется спектр (фиг. 4.6).

5. Если обе поверхности прозрачного предмета не являются плоскими и расположенными под углом друг к другу, а изогнуты (обычно в виде сферы), как на фиг. 4.7, то свет, выходящий из одной точки по одну сторону прозрачного предмета, можно собрать также в одной точке по другую его сторону. Прохождение света через сферическую линзу показано на фиг. 4.7. Так как угловое изменение направления света различно для каждой длины волны, то наблюдается разделение света различных длин волн в направлении, перпендикулярном такой линзе, и свет с более короткими длинами волн собирается в точке, находящейся ближе к линзе, чем свет с большими длинами волн. Это явление называется

хроматической аберрацией[1]. Можно утверждать, что обычно сплошной прозрачный материал, имеющий только две поверхности, не способен собрать свет, выходящий из одной точки, снова в одной



Ф и г. 4.6. Оптическая схема, показывающая разложение света стеклянной призмой с образованием спектра.



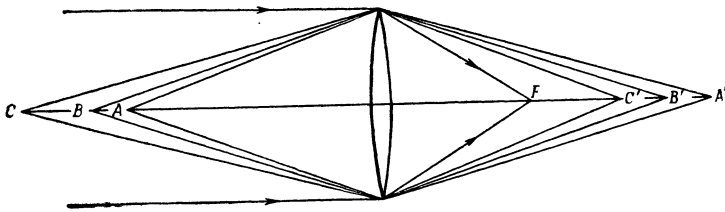
Ф и г. 4.7. Лучи света от точечного источника S преломляются линзой со сферическими поверхностями и собираются в виде изображения источника света в точке S'.

точке. Свет из множества точек, представляющих собой реальный объект, расположенный с одной стороны линзы, не будет собран линзой в виде совершенного изображения с другой ее стороны, если все свойства линзы не откорректировать соответствующим образом. Для получения улучшенного оптического изображения обычно необходимо использовать несколько различных видов стекла, имеющих большое число поверхностей.

Первое свойство линзы заключается в том, что чем дальше от линзы расположена светящаяся точка, тем ближе к линзе расположена точка, в которой получают ее изображение. На фиг. 4.8 изображены три различных случая. Однако существует определенное ограничение этого свойства линзы, так как независимо от

[1] Помимо указанной автором *хроматической аберрации*, простая линза обладает *сферической аберрацией*, сказывающейся в том, что даже в случае монохроматического излучения параллельные лучи, падающие на линзу на различных расстояниях от ее оптической оси, не собираются в ее фокусе. — *Прим. ред.*

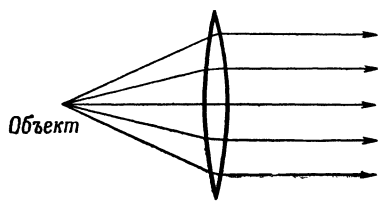
того, как далеко от линзы находится объект, его изображение не может быть ближе определенного расстояния, называемого *фокусным расстоянием* линзы. Оно зависит от свойств матери-



Ф и г. 4.8. Изменение расстояния до изображения в зависимости от размещения предмета относительно линзы.

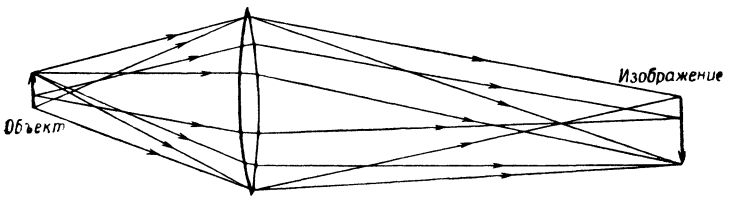
ала, из которого изготовлена линза, и от кривизны ее поверхностей. Расстояние равно фокусному, если источник света настолько удален от линзы, что все лучи, попадающие в нее из любой его *точки*, можно считать параллельными.

Второе свойство линзы заключается в том, что свет из светящейся точки, помещенной в фокусе линзы, выходит в виде параллельного пучка лучей, как это показано на фиг. 4.9. Эти правила применимы пока только к бесконечно малым источникам света, лежащим на воображаемой линии, проходящей через центр линзы перпендикулярно к ее плоскости. Такие условия редко достигаются на практике, и большинство объектов, воспроизводимых линзами, имеет достаточно большую площадь. Однако принципы образования изображений таких объектов те же самые, так как любой объект можно представить состоящим из очень большого числа маленьких светящихся площадок, каждая из которых посылает бесконечно большое число световых лучей. Если линза совершенна, то все лучи из любой точки, падающие на первую поверхность линзы и проходящие через нее, сойдутся в одной точке с другой стороны линзы. Совокупность всех точек, в которых сходятся лучи от всех маленьких площадок объекта, и является изображением объекта, и если в ту плоскость, где сходятся все лучи, поместить какую-либо белую поверхность, образованное линзой изображение объекта становится видимым (фиг. 4.10).



Ф и г. 4.9. Свет, излучаемый точечным источником, расположенным в фокусе линзы, выходит из линзы в виде параллельного пучка лучей.

Следует заметить, что допущение о том, что линза совершенна, не является точным. Когда имеют дело с реальными линзами и с объектами значительных размеров, необходимо принимать во внимание присущие линзе недостатки, степень ее коррекции и т. п. Обсуждать все это здесь мы не имеем возможности. Достаточно



Ф и г. 4.10. Образование линзой изображения предмета.

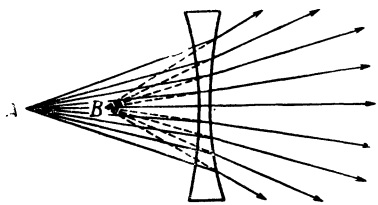
только указать, что для неоткорректированных линз качество изображения объекта при переходе от оптической оси к краю объекта обычно сильно ухудшается и изображение выглядит искривленным и нерезким.

Конденсорные линзы

С помощью прозрачных тел, кривизна поверхностей которых рассчитана соответствующим образом, можно так изменить распределение света, излучаемого некоторым источником, что будет достигнуто почти любое желательное угловое распределение интенсивностей. Линзы, используемые для таких целей, называются *конденсорными* линзами, так как они направляют, конденсируют свет, падающий на линзу, в определенном направлении. Конденсорные линзы широко применяются в таких приборах, как кинопроекторы, когда необходимо направить большое количество света на маленькое изображение (кинокадр), и в прожекторах, в которых они используются для направления света на небольшой участок объекта. Как будет показано ниже, при помощи конденсорных линз можно имитировать иное, чем в действительности, расположение источников света. Однако, естественно, все такие конденсорные системы не могут концентрировать на данной площадке больше света, чем его попадает на поверхность линзы. Если источник света имеет конечные размеры, интенсивность в какой-либо точке ограничена также образованием действительного изображения источника света.

Концентрация света, однако, не единственный возможный вариант изменения направления света, которое осуществляют с помощью прозрачных тел. Направление света, падающего на поверхность, всегда изменяется по законам преломления. В вышеупомяну-

тых линзах это свойство использовалось для концентрации света. Если поверхности линзы имеют иной характер кривизны, линза будет рассеивать свет, как показано на фиг. 4.11. При этих условиях свет распространяется так, как если бы источник был помещен в точке B, а не в A. Соответственно свет распространяется в пространстве в большем угле, чем если бы источником его была точка A, и освещенность на некотором данном расстоянии от линзы оказывается соответственно *меньше*. Такие линзы называют *рассеивающими*.



Фиг. 4.11. Диаграмма, иллюстрирующая действие двояковогнутой линзы.

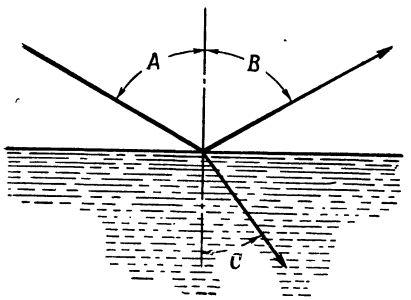
Если свет падает на *неровную* поверхность, то, пройдя через нее, он будет подчиняться описанным выше правилам в каждой небольшой площадке этой поверхности. При достаточных размерах этих площадок и их регулярном расположении интенсивность прошедшего через прозрачный материал света также образует определенный узор; но если площадки достаточно малы и ориентированы беспорядочно, свет, выходящий с другой стороны прозрачного тела, будет распространяться во всевозможных направлениях. Указанным свойством обладает стекло, поверхность которого подвергалась обработке пескоструйным аппаратом или другим подобным способом для придания ей шероховатости; такое стекло называют *матовым*. Подобный же эффект получают при наличии в стекле мелких посторонних включений. Рассеяние света происходит в этом случае из-за изменения направления света этими частицами.

Отражение

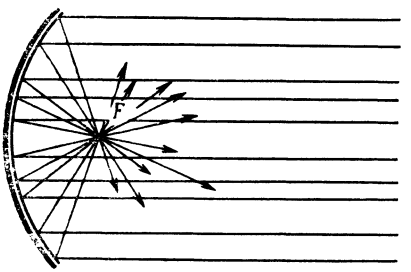
Как упоминалось выше, падающий на поверхность предмета свет либо проходит внутрь него и поглощается им, либо возвращается в среду, из которой он попал на предмет, т. е. отражается от него. Отражение света также подчиняется определенным законам, которые для гладкой поверхности проиллюстрированы фиг. 4.12. Свет, падая на поверхность слева, образует угол A с перпендикуляром к поверхности. Закон *преломления* определяет отношение угла A к углу C для света, прошедшего в новую среду. Закон зеркального *отражения* гласит, что угол отражения B *всегда* равен углу падения A независимо от природы материала или длины волны света. Единственное требование состоит в том, что рассматриваемая площадка должна быть *плоской*. Этот очень простой закон создает ряд

возможностей, которые по существу идентичны с возможностями линз. Наиболее важные факторы можно подытожить:

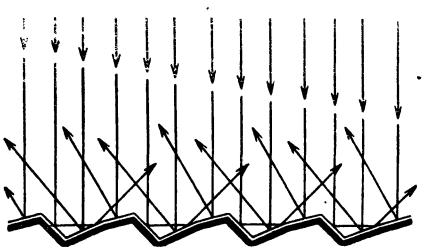
1. Свет, отраженный от большой гладкой поверхности, действует и выглядит так, как будто бы он вышел изнутри предмета *через* эту поверхность.



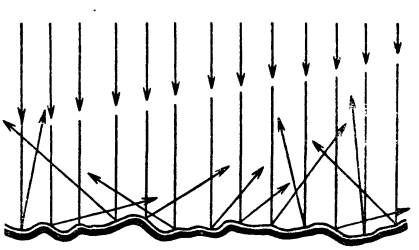
Ф и г. 4.12. Отражение и преломление света на плоской поверхности.



Ф и г. 4.13. Свет, собранный в точке F с помощью изогнутой отражающей поверхности.



а



б

Ф и г. 4.14. Две поверхности, отражающие свет.

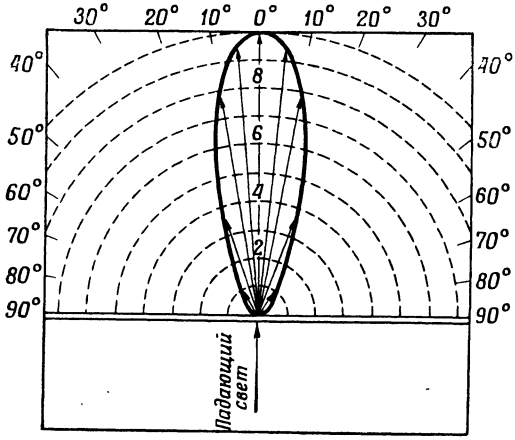
а — поверхность отражает свет в виде регулярного рисунка; *б* — поверхность отражает свет во всевозможных направлениях.

2. Изогнув соответствующим образом поверхность, как показано на фиг. 4.13, можно собирать свет так же, как это делают с помощью линзы.

3. Если поверхность, отражающая свет, неровная, то могут наблюдаться те же два случая, как и для поверхностей, пропускающих свет, т. е. отраженный свет может распределяться неравномерно или рассеиваться во всевозможных направлениях. Эти два случая показаны на фиг. 4.14.

Используя явления преломления и отражения света, можно, следовательно, по желанию менять *направление* света, но при всех осуществляемых таким образом видоизменениях мы не можем увеличить общий световой поток.

Чтобы показать направления света, которые придает последнему отражающий или пропускающий материал, можно использовать график, где интенсивность света для различных направлений изображена линиями различной длины. Такой график для света, проходящего *сквозь* материал и имеющего небольшие неоднородности, показан на фиг. 4.15. Для удобства здесь показан только



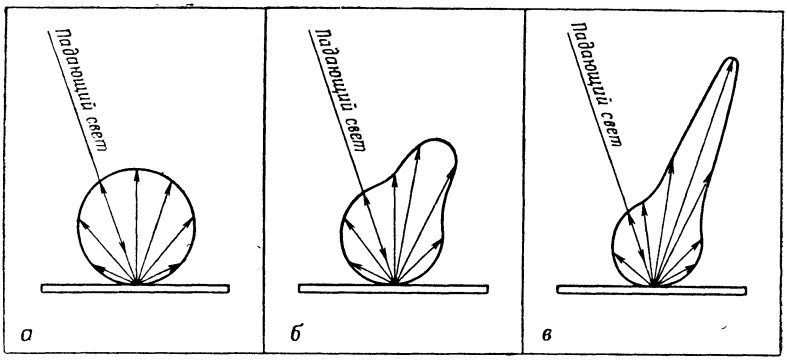
Ф и г. 4.15. Полярная диаграмма пучка света после прохождения через прозрачное стекло, матированное с обеих сторон с помощью пескоструйного аппарата.

маленький пучок света; результат был бы аналогичным и для более широкого пучка лучей, но его просто труднее было бы изобразить графически. Если поверхность предмета не пропускает свет, а отражает его, то направление отраженного света было бы обратным направлению падающего света. Подобные кривые распределения света для материалов с различной рассеивающей способностью показаны на фиг. 4.16. Диаграмма *а* соответствует материалу, полностью рассеивающему свет, у которого мельчайшие грани поверхности вещества расположены во всевозможных направлениях. Диаграммы *б* и *в* соответствуют материалам с меньшей степенью рассеяния. В этих примерах только определенная часть света рассеивается, а остальной свет либо проходит через поверхность, либо зеркально отражается от нее [1].

[1] В зависимости от формы кривой рассеяния, которую обычно называют индикатриссой рассеяния (индикатрисса — окружность, касательная к поверхности), различают чисто направленное (зеркальное) отражение, полностью диффузное отражение и смешанное отражение.— *Прим. ред.*

После рассмотрения основных законов отражения и пропускания света уместно рассмотреть проблему освещения с несколько иной точки зрения, а именно рассмотреть в качестве источника света светящееся тело с рефлектором или линзой.

Очевидно, что основным результатом использования как рефлектора, так и линзы является изменение распределения освещенности в пространстве. Конденсорные линзы концентрируют излучение

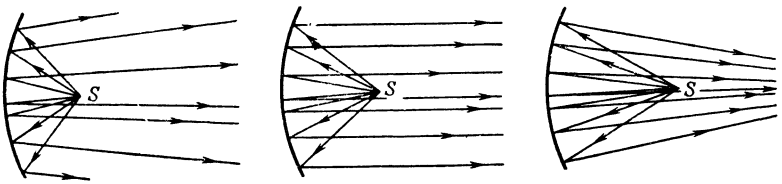


Ф и г. 4.16. Полярные диаграммы света, отраженного от поверхностей с различной степенью шероховатости.
Слева направо шероховатость поверхностей уменьшается.

источника света в значительно более тонкий пучок, чем пучок света, излучаемый без них. При этом изменение интенсивности вдоль этого пучка бывает значительно уменьшено. Если источник света малых размеров помещен в фокусе линзы, существенных изменений освещенности в световом пучке может не наблюдаться даже на относительно больших расстояниях. Типичным примером такой комбинации является театральный прожектор. В рассмотренных условиях, однако, ширина образовавшегося пучка света не может быть значительно больше ширины линзы. Для предельного теоретического случая, когда существенного изменения освещенности при изменении расстояния не наблюдается, размер сечения пучка света на всех расстояниях должен равняться размеру линзы; такое условие почти соблюдается в некоторых прожекторах, рассчитанных для работы на больших расстояниях.

Точно так же могут концентрировать и направлять свет параболические и сферические зеркала, установленные за источником света. При использовании параболических рефлекторов и источников света малых размеров, например вольтовой дуги, можно получать очень ровные световые пучки, интенсивность которых мало уменьшается даже на расстояниях, измеряемых километрами. Наи-

более характерным примером будет, вероятно, прожектор противовоздушной обороны. Однако можно изготовить и прожекторы меньшего размера, соответствующим образом приспособленные для фокусировки на различные расстояния. Такие прожекторы могут посылать свет на достаточно большие расстояния. Конечно, как и при использовании линз, световой пучок для работы на максимальном расстоянии должен иметь диаметр, приблизительно равный диаметру рефлектора. Так как проще изготовлять большие рефлекторы, чем большие линзы, такие прожекторы почти всегда выпускаются с рефлекторами.



Ф и г. 4.17. Диаграмма, показывающая влияние изменения положения источника света на пучок света, отраженного от изогнутой поверхности.

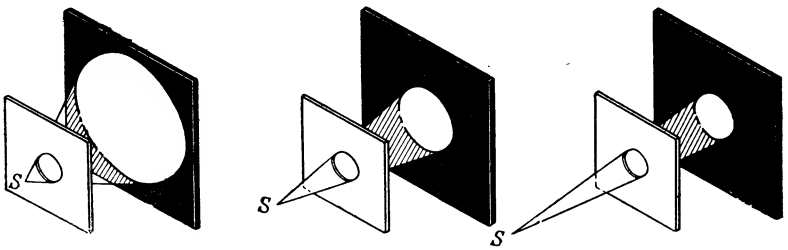
При любом из рассмотренных типов источников света, изменяя расположение источника относительно линзы или рефлектора, можно получить пучок света, площадь сечения которого будет уменьшаться или увеличиваться по мере удаления от источника света. Кроме того, можно изменять распределение интенсивностей, помещая перед источником света рассеиватели. Все эти возможности используются на практике, особенно часто профессионалами-фотографами, для регулирования качества освещения (фиг. 4.17).

Источники света и тени

Рассмотрим случай, когда на пути света расположен некоторый предмет, отбрасывающий заметную тень. При этом как вид самого предмета, так и вид его тени могут в значительной степени меняться.

Если источник света без линзы или рефлектора поместить рядом с круглым отверстием в большом куске непрозрачного материала, то количество света, проходящего через это отверстие, зависит от расстояния до отверстия (или апертуры, как обычно называют такое отверстие) и от его размеров. Свет, прошедший через отверстие, распространяется за ним в виде пучка конусообразной формы, положение краев которого определяется линиями, проведенными от источника через края отверстия. Предположим теперь, что за

отверстием помещен экран, который можно отодвигать от отверстия и приближать к нему. Очевидно, что на экране образуется круглое световое пятно, размер которого будет изменяться в зависимости от расстояния между отверстием и экраном; пятно будет тем больше, чем больше расстояние. Подобный же эффект получают, если



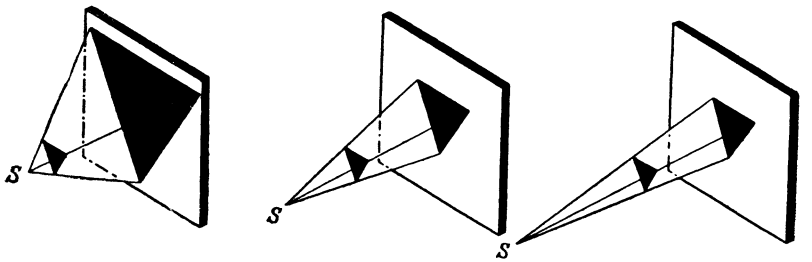
Ф и г. 4.18. Диаграмма, показывающая влияние положения источника света на форму пучка, проходящего через круглое отверстие.

двигают маску с отверстием, оставив экран неподвижным. Угол, который образует пучок света за отверстием, т. е. степень расширения пучка за отверстием, зависит от расстояния до источника света. Это показано на фиг. 4.18, где слева направо изображены случаи малого, среднего и большого расстояний от источника света S. Этот угол в свою очередь определяет скорость, с которой изменяется размер светового пятна при изменении расстояния между отверстием и освещаемым экраном. В предельном случае, когда источник света удален на большое расстояние, существенных изменений размера освещенного пятна при значительных изменениях расстояния не наблюдается, интенсивность также остается приблизительно постоянной (в такой же степени, как и размер пятна). Примером является солнечный свет. Закон обратных квадратов в этом случае все еще справедлив, но реально возможные изменения расстояния малы по сравнению с полным расстоянием до источника света.

Точно такое же явление наблюдается, если на пути света вместо отверстия в большом экране поместить круглый диск из непрозрачного материала. Такой диск отбрасывает тень на освещаемый пучком света экран. Образование тени, ее форма, изменение ее размеров при изменении расстояния от источника света и от экрана определяются теми же самыми правилами, что и образование светового пятна за отверстием в экране. Случаи, подобные представленным на фиг. 4.18 для отверстия, показаны на фиг. 4.19 для непрозрачного треугольника.

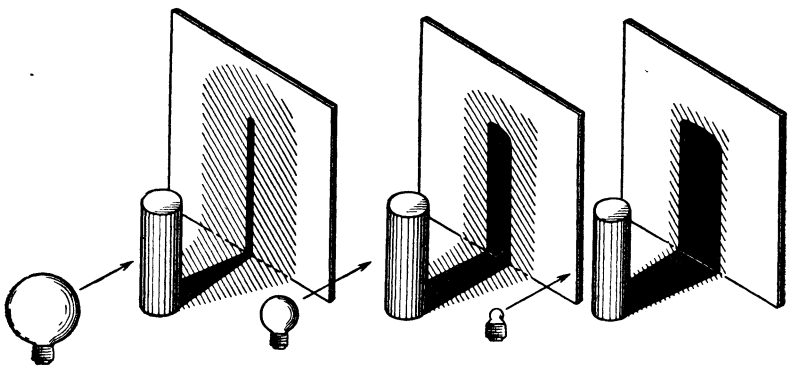
Иллюстрации на фиг. 4.18 и 4.19 относятся к случаю небольших источников света. Такие источники света дают тени с очень

резкими краями. Однако, если размеры источника света не очень малы, края таких теней нерезки, и чем больше размер источника света по отношению к расстоянию, тем менее резкими будут края тени. Этот принцип схематически показан на фиг. 4.20 для трех источников света различных размеров. На фигуре видно, что тень



Ф и г. 4.19. Диаграмма, показывающая влияние расстояния между источником света и предметом, отбрасывающим тень, на размер тени.

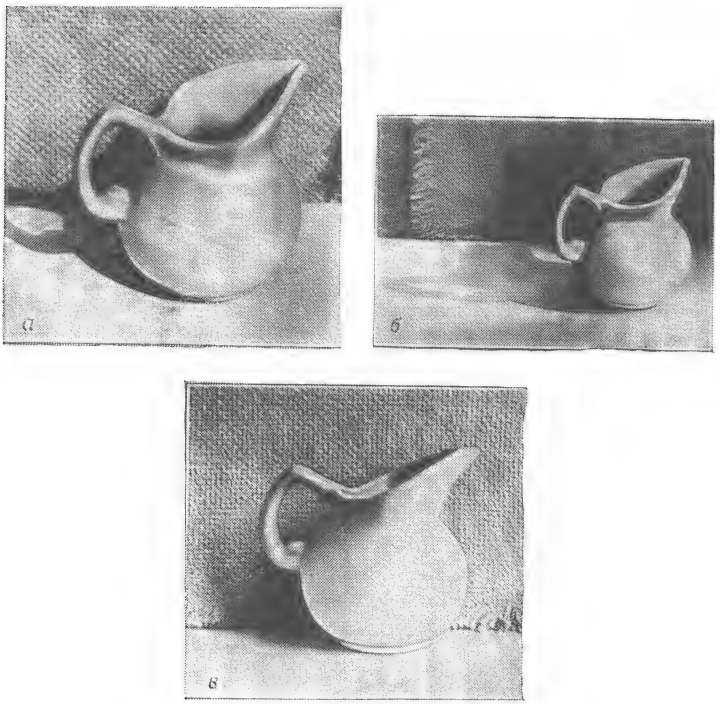
состоит из двух частей: очень темного участка — *полной тени* и частично освещенного участка — *полутени*. Участок полной тени совершенно затенен, а участок полутени затенен лишь частично.



Ф и г. 4.20. Диаграмма, показывающая изменение распределения света по площади тени при изменении размера источника света.

При переходе от внешнего края участка полутени к внешнему краю участка тени интенсивность освещения постепенно уменьшается от максимума до нуля. Относительные размеры участка полутени, как здесь показано, зависят только от размера источника света, но совершенно очевидно, что они зависят также и от расстояния предмета и источника света от экрана.

Все изображенное на диаграмме фиг. 4.20 по необходимости преувеличено. Однако примеры, взятые из повседневной жизни, показывают, что влияние размеров источника света на резкость краев



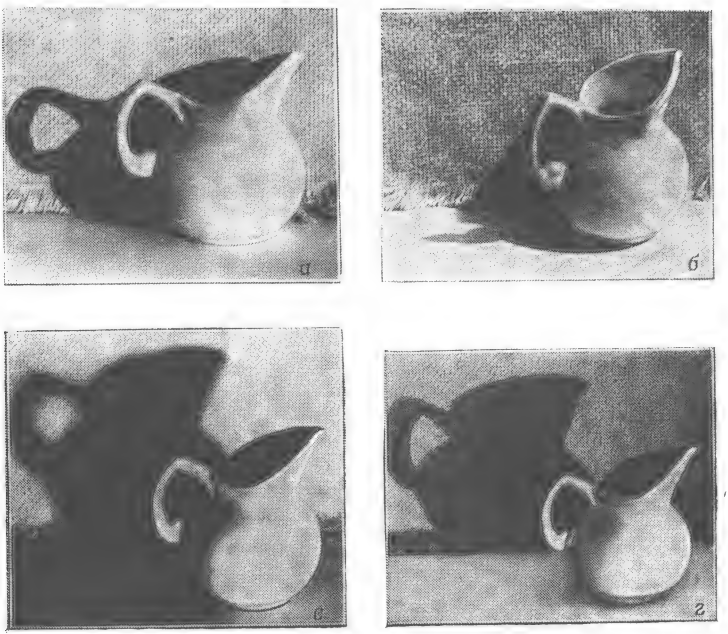
Фиг. 4.21. Предметы и тени от них.

а — при освещении солнечным светом; *б* — при освещении светом близко расположенной лампы накаливания; *в* — при освещении светом неба, полностью закрытого облаками.

тени и в действительности уж очень велико. На фиг. 4.21 приведены фотографии, показывающие образование теней при освещении различными источниками света.

На основе одних геометрических представлений получается, что маленький источник света, установленный на большом расстоянии, должен давать достаточно резкую тень даже в том случае, если бы объект был расположен на некотором расстоянии от экрана. Это в действительности бывает не совсем так. Даже в том случае, если бы свет падал на края предмета в виде строго параллельного пучка, участок за объектом оказался бы освещенным, но очень сла-

бо благодаря *дифракции*, и переход от освещенных к неосвещенным участкам за предметом происходил бы на заметном расстоянии. При малых расстояниях этот эффект незначителен, однако, если попытаться «отбросить» тень очень далеко, эффект становится заметным вполне отчетливо.



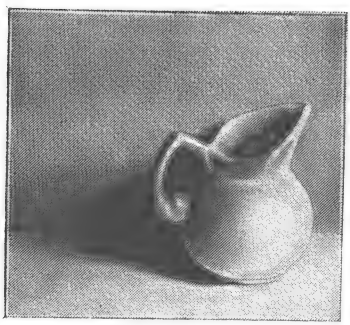
Ф и г. 4.22. Предметы и тени от них.

а — при освещении солнечным светом, проходящим через окно комнаты; *б* — при освещении двумя лампами: с рефлектором и без рефлектора; *в* — при освещении лампой без рефлектора; *г* — при освещении лампой, расположенной за картонной маской, имеющей отверстие диаметром 6 *мм* (фотоснимки сделаны в комнате, довольно сильно освещенной рассеянным светом).

Тени, следовательно, ощутимо изменяются при изменении размера источника света и расстояния от него. По размеру и положению тени, а также по характеру изменения освещенности на границе тени можно сделать выводы о природе источника света. Такие выводы всегда основываются на опыте и в значительной степени интуитивны, однако чрезвычайно убедительны. На фиг. 4.22, например, показан один и тот же объект, освещенный источниками света четырех различных типов. В большинстве, если не во всех случаях, указание источника света вряд ли вообще необходимо.

Источник света, так сказать, может быть «прочувствован» по изображению.

До настоящего времени источники света рассматривались нами всегда как «первичные», т. е. предполагалось, что они изготовлены из материала, испускающего свет. Когда же свет падает на диффузно отражающую (или пропускающую) поверхность, он рассеивается во всех направлениях и эту *поверхность* можно рассматривать в качестве нового источника света. Во многих случаях такой подход является самым осмысленным методом оценки влияния такой поверхности на общие результаты освещения. Когда необходимо оценить свет, попадающий на определенный объект, следует учитывать весь свет, попадающий на него от всех отражающих поверхностей, расположенных рядом. Такой свет очень часто имеет достаточно высокую интенсивность и, вероятно, совершенно другие качества, нежели «прямой» свет от «первичного» источника, главным образом потому, что освещенность от больших источников света при увеличении расстояния уменьшается очень медленно. Например, в комнате со стенами, окрашенными в светлые тона, лампа (расположенная около стены), относительно сильно освещающая стену, может создавать непосредственно небольшую освещенность в середине комнаты, в то же время свет, отраженный от стены, может создавать в середине комнаты почти такую же освещенность, как и непосредственно около стены. Для теней, полученных от света, отраженного от такой стены, также характерна «нерезкость». Свет, отраженный стеной, может в значительной степени определять вид освещения любого объекта. Фотография теней, полученных при таком освещении, показана на фиг. 4.23.



Фиг. 4.23. Предмет и тень от него при освещении рассеянным светом, отраженным от плоской стены.

Восприятие освещения

Приведенное выше обсуждение геометрических факторов и интенсивности освещения приводит к двум важным заключениям относительно освещения, которые будут сформулированы в настоящем разделе. В последующих главах вопросы восприятия освещения будут рассмотрены более подробно.

Когда наблюдатель видит предмет или группу предметов (например, когда он рассматривает пейзаж), он прежде всего узнает

а

б

в

Влияние природы источника света на вид поверхности предмета.

а — при небольшом направленном источнике света подчеркивается блеск поверхности; *б* — при большом источнике рассеянного света получают «шелковистый» эффект; *в* — при равномерном освещении рассеянным светом шарики выглядят темными и монотонными.

отдельные предметы. Кроме того, существует общее «ощущение» или восприятие освещения всего пейзажа. Обе эти реакции на источник освещения тесно связаны между собой, так как мы одновременно и видим предметы с их характерными внешними признаками при данных условиях освещения и «видим, чувствуем», как падает свет на предметы, которые мы узнаем. Одновременное видение обеих фаз обусловлено в значительной степени обсуждавшимися выше явлениями. Основными факторами являются отношение освещенностей различных участков наблюдаемого пейзажа и характеристики теней на предметах и вокруг них.

Для ландшафта основными источниками света являются солнце и небо, хотя констатация этого факта едва ли объясняет множество эффектов освещения, которые могут создать эти источники света. Вероятно, точнее будет сказать, что дневное освещение может быть самым различным: начиная от условий освещения источником света, занимающим всю поверхность неба (облака в пасмурный день), до условий освещения, соответствующих единственному источнику света, расположенному под очень небольшим углом (солнце, находящееся под очень небольшим углом к поверхности земли). Возможны также разнообразные промежуточные комбинации при наличии освещенных облаков на разных участках неба. Эти различные условия освещения, однако, имеют общую характерную черту: в любом случае источники света расположены так далеко от земли, что интенсивность их существенно не изменяется при изменении расстояния. Освещенности, следовательно, везде одинаковы, за исключением участков, на которые отдельные предметы отбрасывают тень.

Суммарным результатом является то, что при данных условиях тени от всех объектов, освещенных одинаковым количеством света от неба, имеют одинаковые интенсивности. Все тени также имеют одинаковые размеры по отношению к объектам. Эти характерные особенности ассоциируются непосредственно с условиями естественного освещения в природе, и когда все представленное на кадре соответствует этим условиям, наблюдатель делает выводы о том, что освещение осуществлялось дневным светом. Когда же предпринимаются попытки имитировать в больших масштабах эти эффекты, используя искусственное освещение, обнаруживается, что такая имитация практически невозможна, хотя ее и успешно осуществляют в небольших масштабах, когда этого требуют обстоятельства.

Использованный выше термин «отношение освещенностей» можно определить как отношение интенсивности света, попадающего на участки пейзажа, освещенные прямым солнечным светом, к интенсивности света в затемненных участках. Это отношение может колебаться от чрезвычайно больших значений для дневного

солнечного света, прошедшего через маленькое отверстие в ветвях густого леса, до единицы в пасмурный день, когда небо целиком покрыто облаками и на предметах не образуется теней.

При искусственном освещении, кроме перечисленных выше факторов, на результаты освещения оказывают влияние изменения интенсивности освещения при изменении расстояния от источника света и изменения размеров теней, а также градации при переходе от освещенных к теневым участкам при изменении расстояний от предмета до источника света и фона. Все эти особенности и приводят к тому, что пейзаж, освещенный искусственным светом, по виду существенно отличается от того же пейзажа, освещенного дневным светом. Эти же факторы приводят к необходимости использовать в дополнение к понятию «отношение освещенностей» понятие «градиент» освещения пейзажа.

Комбинированный эффект всех указанных выше факторов определяет вид пейзажа как целого и вид отдельных предметов этого пейзажа. Когда пытаются описать визуальное впечатление, произведенное на наблюдателя, обычно используют два слова; может быть, целесообразно рассмотреть их смысл более подробно, хотя оба они уже упоминались выше. Первое из них — слово «контраст». Как и многие другие слова, это слово используется в двух взаимосвязанных, но совершенно противоположных значениях. Каждый предмет состоит из группы различных отражающих поверхностей, и свет, попадающий в глаз наблюдателя, различен для всех этих отражающих поверхностей. Так, если наиболее темные участки объекта отражают в глаз наблюдателя 1% света, а самый светлый участок отражает 90% *при равномерном освещении этих участков светом одинаковой интенсивности*, отношение интенсивностей объекта может быть обозначено как 90 : 1. Это отношение можно назвать контрастом [1] объекта. Предположим далее, что рассматриваемым объектом является шахматная доска, состоящая из белых и черных квадратов, и что на половину этой доски падает тень. Предположим также, что количество света, падающего на затемненный участок, составляет $^1/_4$ количества света, попадающего на остальную часть доски. Количество света, попадающего в глаз наблюдателя от темных квадратов затемненной части доски, составляет только $^1/_4$ количества света, попадающего в глаз от таких же черных квадратов на другой стороне доски. Полное от-

[1] Терминология, предлагаемая автором, является несколько искусственной и не используется в отечественной технической литературе. Под контрастом обычно понимается отношение разности яркостей наблюдаемых объектов к яркости фона. Естественно, что величина контраста зависит от равномерности освещения. В тех случаях, когда нужно охарактеризовать контраст картины независимо от ее освещения, он определяется соответствующими отношениями величин коэффициентов яркости объектов.— *Прим. ред.*

ношение интенсивностей света, попадающего в глаз наблюдателя, теперь составляет 90 × 4, или 360 : 1. Это отношение может быть названо контрастом освещенного объекта. Так как отношение освещенностей, создающих такой контраст освещенного предмета, составляет 4 : 1, об этом отношении можно говорить как о контрасте освещения. Таким образом, имеются три способа рассмотрения контраста, и при изучении материала книги совершенно необходимо вполне отчетливо их различать. И в дальнейшем в книге будет использована эта терминология, но читателя следует заранее предупредить, что в остальной литературе такого четкого разделения понятия о контрасте нет. С понятием о контрасте связаны многие аспекты цветных работ, и об этом будет часто упоминаться в последующих главах. Вид пейзажа определяется главным образом контрастом освещенного объекта (предмета). Понятие «блескость» определяет комплексную зрительную реакцию на весь интервал интенсивностей света, видимого глазом. По данному пейзажу одновременно с этой общей реакцией (и в значительной степени как часть ее) наблюдателем производится бессознательное определение как полной интенсивности *освещения*, так и той части этого света, которая достигает его глаза. *Оба* эти фактора определяются в большей степени *контрастом* пейзажа, чем *действительными* интенсивностями света. Ниже будет показано, что глаз человека может вполне точно установить наличие отклонений в интенсивности в категориях «больше» или «меньше», но не пригоден для точного определения общего количества света. Автомобильная фара ночью может создать такое же сильное и ослепляющее до боли впечатление интенсивности света, как солнце в полдень, и соответствующим образом освещенные декорации на сцене могут передать интервал яркостей, наблюдаемый как при дневном, так и при искусственном освещении.

Глаз, следовательно, не является подходящим прибором для определения интенсивностей освещения. В гл. X, кроме того, будет показано, что глаз нельзя также использовать для точных оценок и градиента освещения или контраста освещения. Для точного определения освещенности данного объекта известно только два точных метода. Оба метода основаны на использовании физических измерений. Свет следует измерять либо таким прибором, измерения которым производятся без участия глаза, либо каждую отдельную площадку следует сравнивать непосредственно с другой площадкой, освещенной известным источником света при условиях, в которых яркости обоих полей сравнения могут быть уравнены. Разработано множество способов для выполнения таких измерений; число факторов, оказывающих влияние на результаты измерений, чрезвычайно велико.

ГЛАВА V

Цветные предметы

До сих пор мы рассматривали только свет, спектральное распределение энергии которого полностью определяется выбором источника света. Учитывались только такие изменения, при которых распределение энергии по спектру оставалось неизменным. Описанные выше отражение и пропускание называют неселективными. В этих случаях меняется только направление и количество света, а *относительные* количества энергии при различных длинах волн остаются неизменными.

Селективное поглощение

Почти все материалы поглощают падающий на них свет селективно, т. е. больше поглощают света одних длин волн и меньше — других. Результатом такого поглощения является изменение распределения энергии отраженного света по сравнению с падающим. В некоторых случаях разница эта мала, в других она может быть весьма значительной; но всегда, когда не наблюдается излучения света материалом за счет люминесценции, изменения обязательно сопровождаются *уменьшением* количества света на некоторых участках спектра. Так как поглощается только часть падающего на предмет света, то можно считать, что происходит вычитание энергии из общего света, падающего на предмет. Поэтому такой процесс часто называют субтрактивным (вычитательным).

Когда наблюдатель смотрит на свет, отраженный от поверхности и уже частично поглощенный ею, и сравнивает его со светом источника, освещающего эту поверхность, он видит, что произошло изменение цвета. Степень такого изменения и действительный цвет, который будет ощущать наблюдатель, зависят как от избирательного поглощения света, так и в значительной степени от ряда других обстоятельств. Практически и притом вполне обоснованно указанное изменение состава света приписывают *цвету предмета*. При этом под цветом предмета подразумевают тот его цвет, который наблюдают *при дневном свете и привычном окружении* данного предмета. При других обстоятельствах необходимо принимать во внимание наряду с физическим распределением энергии также психофизи-

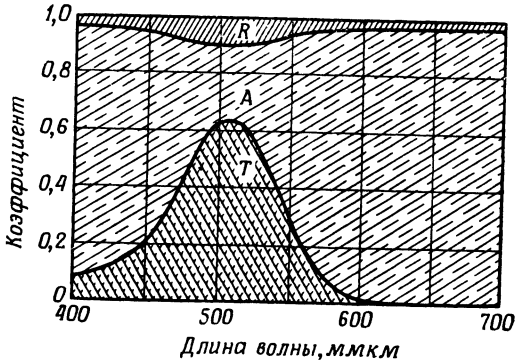
ческие и психологические факторы данной конкретной *ситуации*. Чтобы лучше разграничить явления, вызываемые просто изменениями в распределении энергии, и явления, вызванные определенным ощущением наблюдателя, в этой и последующих главах будут рассмотрены только вопросы физики цветных предметов. В последующих главах будет рассмотрено восприятие окрашенных предметов наблюдателем. Такое разделение принято здесь потому, что многие авторы приписывают ряд явлений особенностям ощущений наблюдателя, тогда как получающиеся результаты часто объясняются просто изменениями спектрального распределения световой энергии. Мы надеемся, что такое строгое разграничение может помочь некоторым читателям понять существо вопроса. При рассуждениях и расчетах необходимо основываться на кривых спектрального распределения энергии источников света, а не на цвете их излучения. *Два источника света, имеющих сильно различающееся распределение энергии по спектру, могут выглядеть совершенно одинаковыми для наблюдателя, но в то же время создавать впечатление совершенно различных цветов в том случае, если свет от них падает на один и тот же цветной предмет.* Очевидно, что описание *цвета* этих источников света не может объяснить указанные факты, в то же время они могут быть полностью объяснены на основе данных о распределении энергии в спектре их излучения.

Отражение, поглощение и пропускание

Когда свет падает на любой материал, могут наблюдаться три явления: он отражается, поглощается или проходит через этот материал. Обычно имеют место все три явления одновременно, но соотношения между ними *при различных длинах волн света различны*. Один из основных законов физики состоит в том, что энергия не исчезает и не создается вновь, а лишь преобразуется из одного вида в другой. Сумма отраженной, поглощенной и прошедшей через материал энергии для каждой длины волны всегда равна энергии падающего света. Поэтому сумма коэффициентов отражения, пропускания и поглощения света равна единице. Так как значения этих коэффициентов зависят от длины волны, то изменение состава света любым материалом лучше всего может быть проиллюстрировано с помощью кривых. На фиг. 5.1 даны зависимости трех указанных характеристик от длины волны света для одного красителя. График характеризует основные свойства материала, которые не зависят от природы падающего света.

Хотя эти кривые дают наглядное представление о свойствах материала, часто оказывается более удобным строить отдельные графики, демонстрирующие различные свойства красителя. Для каждой длины волны эти характеристики выражаются либо десятич-

ными дробями, либо в процентах. Такие кривые для того же красителя, что и на фиг. 5.1, показаны на фиг. 5.2. В каждом отдельном случае обычно нужно рассматривать только один из этих графиков, так как, например, в определенном случае может представлять интерес только отраженный свет и т. д. Однако всегда следует помнить, что остальной свет либо поглощен, либо пропущен рассматриваемым материалом, и кривая отражения не позволяет опреде-

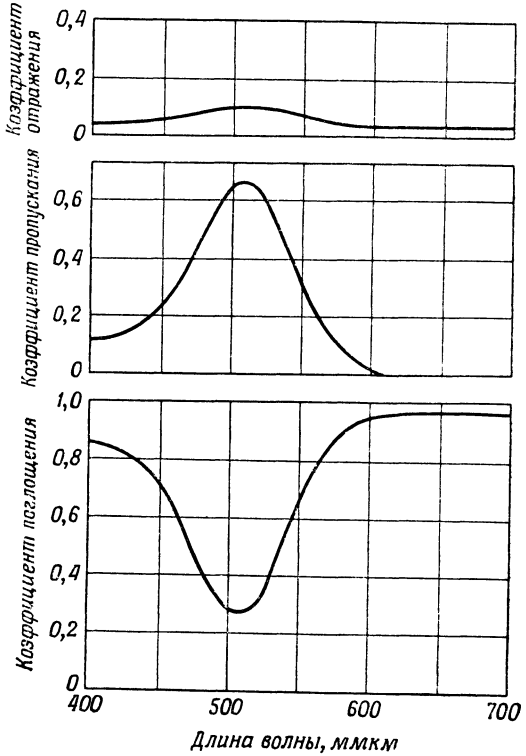


Фиг. 5.1. Кривые, показывающие спектральные коэффициенты отражения R, поглощения A и пропускания T вещества, окрашенного зеленым красителем.

лить, сколько света поглощено, если при этом неизвестно количество пропущенного света.

Многие материалы, например цветное стекло, не имеют селективного отражения, хотя и обладают селективным поглощением; прошедший через такой материал свет имеет определенный цвет, но спектральный состав отраженного света такой же, как и света, испускаемого источником[1]. Существуют такие материалы, главным образом металлы, которые обладают селективным отражением, но при обычных толщинах совершенно не пропускают свет. Возможны самые разнообразные комбинации указанных свойств, и, как правило, очень сложно установить истинную причину определенного цвета предмета. Прежде чем рассматривать типичные случаи и подробности селективного поглощения на конкретных примерах, следует разграничить суммарное действие предмета и действие его составных частей. Ниже на простом примере будет пояснено существо вопроса, что облегчит понимание последующего материала.

[1] Автор не учитывает зеркального отражения света от второй поверхности стекла, которое образуется лучами, дважды прошедшими через пластинку стекла и поэтому весьма селективными.— *Прим. ред.*

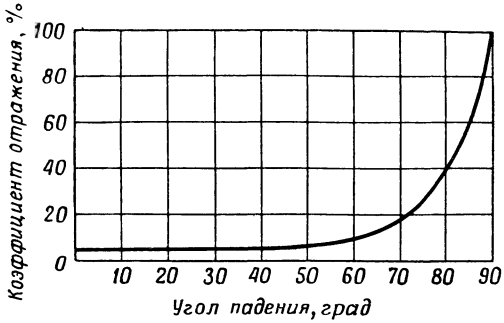


Ф и г. 5.2. Кривые коэффициентов отражения, пропускания и поглощения материала зеленого цвета.

Простой цветной предмет

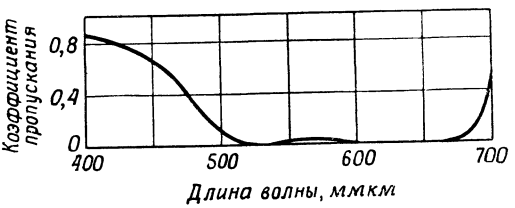
Возьмем пленку из окрашенной желатины, такую же, какие используются для изготовления светофильтров и в театральных прожекторах, или тонкий лист цветного стекла. Для таких материалов характерно неселективное отражение при избирательном пропускании. Степень поверхностного отражения, хотя оно и неселективно, изменяется в зависимости от угла падения света. Если свет падает перпендикулярно поверхности, то отражается прямо по направлению луча только 4% света, а остальная часть его проходит сквозь поверхность. Если свет падает почти параллельно поверхности, то поверхностью отражается около 100% света и он совершенно не проходит через поверхность. При изменении угла падения в этих пределах количество отраженного света увеличивается

от минимального (4%) до максимального (100%). На фиг. 5.3 графически показана зависимость коэффициента отражения от угла падения. Количество света, которое пройдет через переднюю



Ф и г. 5.3. Кривая, показывающая, какая часть падающего света зеркально отражается поверхностью материала с показателем преломления $n = 1{,}5$.

поверхность, следовательно, также зависит от угла падения. И, наоборот, если мы смотрим на поверхность, то количество отраженного от нее света, попадающее в глаз, будет зависеть от направления (или направлений) падающего света. Однако попавший в глаз

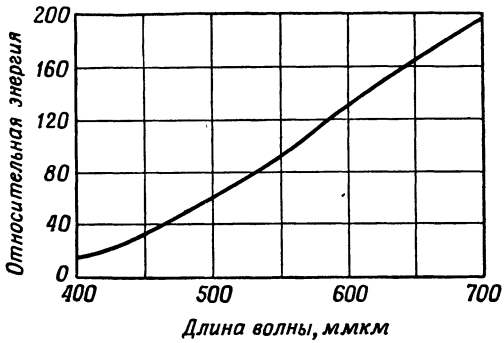


Ф и г. 5. 4. Кривая спектрального пропускания пурпурного сигнального стекла.

свет будет иметь такое же относительное распределение энергии по спектру, как и свет источника.

Теперь рассмотрим свет, который проходит через эту первую поверхность. Если материал прозрачен, то других изменений направления света, кроме простого изменения угла, вызванного преломлением при пересечении поверхности, наблюдаться не будет; свет пройдет через материал и выйдет с другой его стороны, при этом он будет избирательно поглощен красителем, содержащимся в материале. Изменения интенсивности света в процентах при каждой длине волны измерить довольно просто. Кривая пропускания

для сигнального стекла, приведенная на фиг. 5.4, показывает, какая часть света различных длин волн пропускается стеклом. Эту кривую можно было бы рассматривать так же, как графическое выра-



Ф и г. 5.5. Спектральное распределение энергии излучения лампы накаливания.

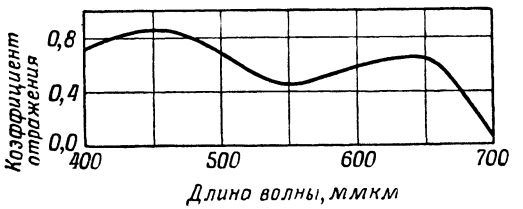
жение относительного распределения энергии по спектру света, прошедшего через стекло, если бы источник света имел равномерное распределение энергии.

Ф и г. 5.6. Произведение кривых фиг. 5.4 и 5.5.

Теперь предположим, что вместо света от источника с равномерным распределением энергии по спектру на светофильтр падает свет от обычной лампы накаливания. Распределение энергии такого света показано на фиг. 5.5, где видно, что энергия, излучаемая лампой при длине волны 450 *ммкм*, меньше $^1/_4$ энергии, излучаемой при 700 *ммкм*. Каким будет этот свет после того, как он пройдет через светофильтр? Кривая пропускания фиг. 5.4 показывает часть прошедшего света в зависимости от длины волны. Количества света, прошедшего через светофильтр, для каждой длины волны будут соответственно определяться произведением относительной энергии (см. фиг. 5.5) на коэффициент пропускания светофильтра (см. фиг. 5.4). Полученное таким образом распределение энергии

пропущенного излучения по всему спектру показано на фиг. 5.6. Состав света, неселективно отраженного от внешней поверхности светофильтра, характеризуется кривой фиг. 5.5.

Теперь предположим, что светофильтр помещен на поверхность с избирательным отражением. Предположим, что эффект избирательного отражения этой поверхности измерен и может быть представлен графически (фиг. 5.7). Как и раньше, эта кривая показы-



Фиг. 5.7. Кривая спектрального отражения селективно отражающей свет поверхности.

вает, какая часть света каждой длины волны будет отражена независимо от распределения энергии света в целом. Действие этой поверхности на свет, проходящий через светофильтр, следовательно, подобно действию самого светофильтра, и распределение энер-

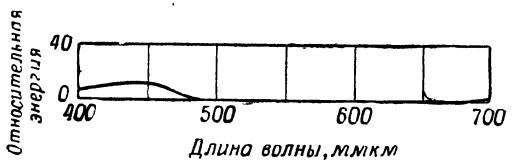
Фиг. 5.8. Кривая отражения света, распределение энергии которого по спектру показано на фиг. 5.6, от поверхности, характеристика отражения света которой представлена на фиг. 5.7.

гии света, отраженного от поверхности, можно, как и раньше, вычислить, поочередно рассматривая отдельные длины волн света. Результирующая кривая показана на фиг. 5.8.

Пусть светофильтр находится в контакте с поверхностью, и свет, отраженный от поверхности, должен, так сказать, второй раз пройти через светофильтр. Во втором случае светофильтр будет действовать таким же образом, как и раньше, ослабляя свет каждой длины волны и пропуская только часть света, показанную на фиг. 5.4. Характеристика света, падающего на нижнюю поверхность светофильтра, дана на фиг. 5.8. Как и в предыдущем примере, можно

вычислить характеристику света, отраженного от верхней поверхности светофильтра (фиг. 5.9).

Теперь предположим, что наблюдатель смотрит на этот же светофильтр, но уже лежащий на цветной поверхности, освещенной данным источником света. Свет, *достигающий его глаза*, будет *смесью* света неизмененного спектрального состава, отраженного от поверхности, и света с измененным составом, который прошел через

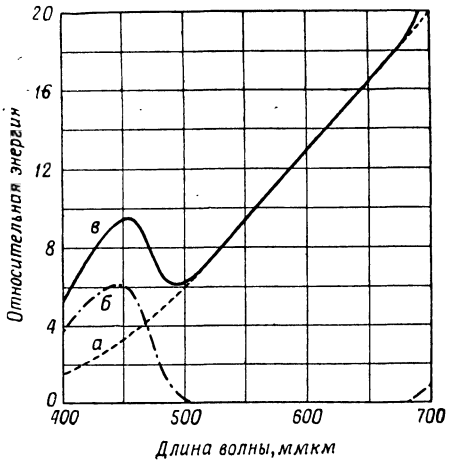


Ф и г. 5.9. Кривая прохождения света, распределение энергии которого по спектру показано на фиг. 5.8, через стекло, характеристика которого представлена на фиг. 5.4.

светофильтр и после отражения от цветной поверхности еще раз прошел через светофильтр. Свет, который видит наблюдатель, является не просто смесью, но такой смесью, состав которой изменяется в зависимости от положения наблюдателя относительно источника света, а также в зависимости от характеристик самого источника света (размер, форма и положение). Предположим далее, что наблюдатель расположен таким образом, что 10% света, падающего на поверхность от источника, попадает в его глаз в результате зеркального отражения. Эту часть легко подсчитать на основе распределения энергии источника, показанного на фиг. 5.5, путем умножения ее на $^1/_{10}$. Однако состав другой части света изменяется трижды. Чтобы правильно вычислить, какое количество такого света попадает в глаз, необходимо знать, какое количество его *попало бы* в глаз наблюдателя, если бы светофильтр и отражающая поверхность совершенно не обладали селективными свойствами, а обеспечивали бы соответственно 100%-ное пропускание (т. е. совершенно не поглощали свет) и отражение. Это попавшее в глаз количество света составляло бы разность от вычитания из первоначального количества света, отраженного поверхностью светофильтра, света, отраженного материалом, находящимся под светофильтром, в направлениях, не совпадающих с направлением взгляда. Последняя величина зависела бы от характера отражения света этой поверхностью (кривая рассеяния). В каждом данном случае необходимо практически *измерять* количество света, идущего в каждом направлении, так как расчетным путем выполнить это очень трудно. Чтобы проиллюстрировать этот принцип, примем,

что 50% света идет в направлении к глазу наблюдателя. Иными словами, количество света, отраженного от белой поверхности, наблюдаемой через бесцветный светофильтр, было бы в 5 раз больше количества света, отраженного поверхностью светофильтра.

Вернемся к распределению энергии по спектру, показанному на фиг. 5.9. Так как действует только половина света, проходящего через верхнюю поверхность светофильтра, числа, показывающие количества энергии при всех длинах волн, следует разделить

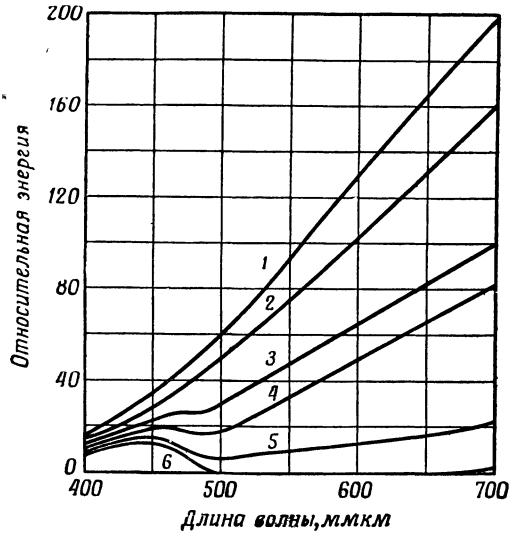


Фиг. 5.10. Кривые, показывающие эффект сложения света, отраженного от поверхности, и света, прошедшего через светофильтр.

на 2. Теперь рассмотрим распределение энергии света, попадающего в глаз наблюдателя. При каждой длине волны в глаз попадает $^1/_{10}$ света неизмененного состава и $^1/_2$ количества света, показанного на фиг. 5.9. Поэтому их можно сложить. Две соответствующие кривые и суммарная кривая представлены на фиг. 5.10. Кривые показывают относительные количества света, попадающие в глаз: отраженного от верхней поверхности светофильтра (*а*); отраженного от нижней поверхности (*б*) и от обеих вместе (*в*).

Как видно из вышеизложенного, даже в этом относительно простом примере вычисления довольно сложны. Однако почти для всех практических целей достаточно знать, что существует *способ* определения действия поверхности, для того, чтобы можно было предсказать конечные результаты. Допустим, что мы хотим узнать, что произойдет, если наблюдатель будет поворачивать голову. Если он повернет ее так, что увеличится часть света, попадающая в глаз после отражения от верхней поверхности, качественные ха-

рактеристики света будут ближе к характеристикам света источника. Если же наблюдатель повернет голову таким образом, что количество такого света несколько уменьшится, то состав света, попадающего в глаз человека, приблизится к представленному на



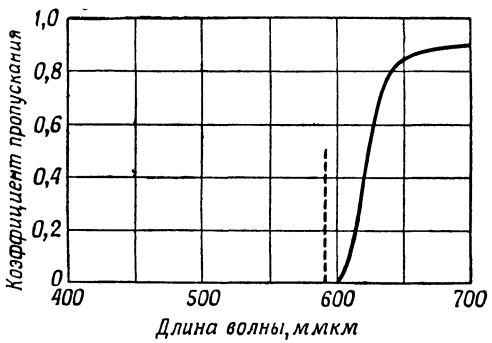
Ф и г. 5.11. Спектральное распределение энергии света, состоящего из смеси различных количеств зеркально отраженного света и света, прошедшего через светофильтр.

1 — 100% отраженного света; *2* — 80% отраженного света и 20% света, прошедшего через светофильтр; *3* — 50% отраженного света и 50% света, прошедшего через светофильтр; *4* — 30% отраженного света и 70% света, прошедшего через светофильтр; *5* — 10% отраженного света и 90% света, прошедшего через светофильтр; *6* — 100% света, прошедшего через светофильтр.

фиг. 5.9. Свет от источника и свет с указанным распределением энергии представляют два крайних различных по составу излучения, попадающих в глаз наблюдателя. Семейство кривых, показывающих вычисленные изменения состава излучения при изменении относительных частей света различного спектрального состава, показано на фиг. 5.11. Более того, очевидно, что изменение формы и положения источника света вызывало бы такой же эффект. Это семейство кривых представляет *возможные* варианты распределения энергии излучения, идущего от объекта.

Сравнение субтрактивных и аддитивных эффектов

Рассмотренный выше пример проиллюстрировал, помимо всего прочего, ряд важных принципов. Прежде всего, когда свет падает на предмет, селективно отражающий, пропускающий или поглощающий свет, наблюдается уменьшение относительного количества света, по крайней мере для некоторых участков спектра. Далее, если свет последовательно падает на несколько таких предметов, то его количество продолжает уменьшаться в соответствии со свойствами каждого из них. Такое последовательное действие принято называть субтрактивным смешением. Слово *смешение* обозначает здесь смешение *эффектов*. (Целесообразность использования такого термина может стать более понятной, если читатель самостоятельно убедится в том, что *порядок*, в каком предметы воздействуют на состав света, не влияет на конечный результат.)



Ф и г. 5.12. Кривая пропускания темно-красного светофильтра и линия, показывающая положение в спектре видимого излучения натриевой лампы.

Вторым обстоятельством, вытекающим из разобранного примера, является то, что, когда в глаз наблюдателя попадает одновременно свет от двух источников с различным спектральным распределением энергии, этот свет воспринимается так, как если бы он исходил от одного источника света с распределением энергии, которое можно вычислить, *складывая* вместе свет от этих двух источников. Такая комбинация света двух или большего числа источников, дающих свет различного спектрального состава, известна как аддитивная смесь.

Все изменения в распределении энергии, которые может претерпевать свет данного источника прежде, чем он достигнет глаза (или любого другого приемника), можно описать, указав, какими из двух типов превращений (одним или обоими) вызваны эти изменения. Они иногда исключительно разнообразны по своему действию, и, если нет уверенности в том, какой из типов изменений наблюдается в данном конкретном случае, предсказанный теоретически результат может не наблюдаться на практике. Для примера допустим, что у нас имеется светофильтр, характеризующийся кривой пропускания, показанной на фиг. 5.12. При нормальном дневном свете он

выглядел бы темно-красным. Предположим, что этот светофильтр установлен перед натриевой лампой, весь видимый свет которой излучается в виде спектральной линии, показанной на фигуре пунктиром. Свет такого источника воспринимается как желтый. Если допустить, что такой цвет излучения вызывается аддитивной смесью желтого и красного света, создающей впечатление желто-оранжевого света, было бы трудно объяснить тот факт, что за светофильтром совершенно не виден свет. Если же это явление рассматривать как чисто субтрактивный эффект, сразу же становится очевидным, что светофильтр не пропускает свет тех длин волн, который излучает источник, и, следовательно, свет не может пройти через светофильтр.

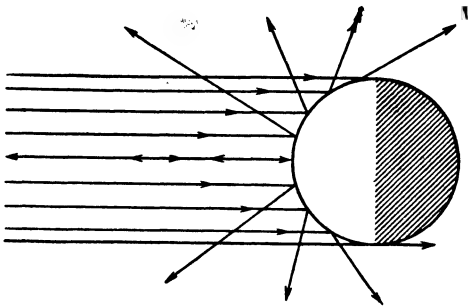
Добавлением раствора одного красителя или пигмента к другому, как мы увидим ниже, можно получить почти *любой* цвет, так как образование цвета при этом является субтрактивным процессом, и полученный свет полностью определяется последовательным или одновременным *вычитанием* энергии света. То, что *не* вычитается, проходит. Только в тех случаях, когда смешиваются два потока *света* от каких-либо источников (аддитивное смешение), можно предсказать конечный результат на основе *цветов* смешиваемых световых потоков. Вычитательные (субтрактивные) изменения состава света можно понять *только* на основе спектральных характеристик источника света и пропускающих или отражающих свет материалов.

Рассеяние

Теперь рассмотрим ряд других факторов, при помощи которых может осуществляться избирательное действие на свет, и покажем относительное влияние на конечные результаты аддитивных и субтрактивных процессов. Одним из наиболее обычных явлений, наблюдаемых в природе, является рассеяние света. При этом селективное действие наблюдается не всегда, однако это очень важно, так как оно является, например, причиной синего цвета неба. В значительно меньшей степени рассеяние света сказывается на образовании такого же синего цвета в некоторых других условиях.

Когда свет проходит через среду, содержащую большое число чрезвычайно мелких частиц, направление света, попадающего на каждую частицу, несколько изменяется. Если поперечники частиц во много раз больше длины волны света, наблюдается только изменение направления света и ничего больше. Это действие называют рассеянием, и оно обычно неселективно. Существует ряд терминов, используемых для описания такого рассеяния: «прозрачный», «мутный», «туманный», «просвечивающий», «полупрозрачный» и «непрозрачный». Этими терминами характеризуются различные

степени неселективного рассеяния — от полного его отсутствия до таких значений, когда свет совсем не выходит из рассматриваемой среды. Однако если размер этих частиц уменьшить настолько, что их диаметры станут соизмеримыми с длиной волны света, то наблюдается избирательное рассеяние света, зависящее от длины волны. Это рассеяние вызывается явлением дифракции; его можно наглядно представить себе как огибание светом частиц, а не как отражение света от их поверхностей. Рассеяние подчиняется известному закону Релея, который гласит, что количество света, рассеянного в любом направлении, обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Практически это означает, что коротковолновый свет рассеивается больше, чем длинноволновый. Часто свет с большой длиной волны вообще плохо рассеивается. Так как в обычных условиях коротковолновый свет кажется синим, а длинноволновый — красным, цвет света, *пропущенного* рассеивающей средой, изменяется по направлению к красному, а рассеянный свет, видимый со стороны, становится совершенно синим. Релеевским рассеянием солнечного света объясняется синева неба.



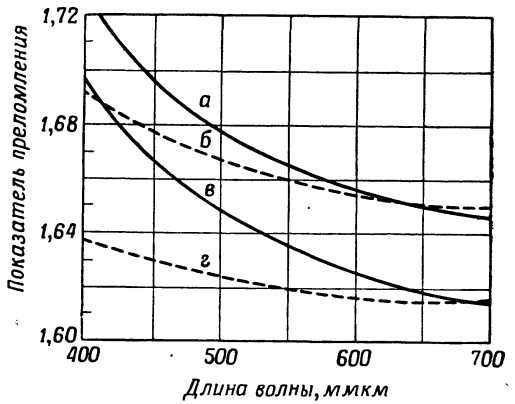
Фиг. 5.13. Схема, иллюстрирующая отражение света от сферы.

Причиной синеватого оттенка дымки при наблюдении удаленных объектов и сравнительно красноватого оттенка *ярких* объектов, наблюдаемых сквозь такую дымку или сквозь туман, является также этот эффект рассеяния. Несколько менее известное, но весьма эффективное явление можно иногда наблюдать с помощью белых молочных стекол. Когда их ставят перед ярким светом, например перед светом солнца, то они имеют темную рубиново-красную окраску, хотя при этом и трудно обнаружить признаки синего рассеянного света. Причиной отчетливо выраженного синеватого цвета разбавленного молока и множества других явлений также является рассеяние света. Во всех тех случаях, когда объект в отраженном свете выглядит голубоватым, особенно при наблюдении в направлении, перпендикулярном направлению падающего света, и коричневым или красноватым в проходящем свете, можно предполагать, что наблюдается избирательное рассеяние света.

Избирательное рассеяние может иногда наблюдаться также и при таких условиях, когда частицы слишком велики и не могут вызывать дифракционных явлений. Интересным примером явлений

такого типа является так называемый светофильтр Христиансена. Этот светофильтр состоит из маленьких бесцветных частиц, например из бесцветных стеклянных бусинок, погруженных в бесцветную жидкость. При прохождении через такую систему параллельного пучка лучей наблюдается селективное пропускание. Это явление можно объяснить следующим образом.

Как уже отмечалось ранее, отражение от полированной поверхности происходит таким образом, что угол отражения света равен углу его падения. Свет, падающий на маленькую сферу, следова-

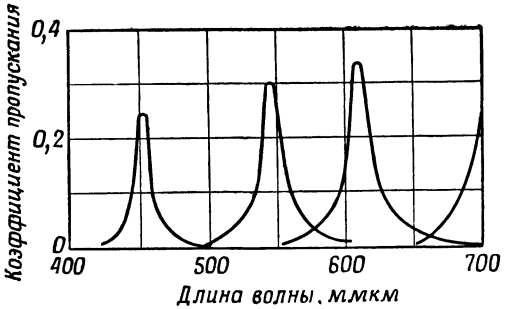


Ф и г. 5.14. Кривые дисперсии сильно преломляющих свет жидкостей и твердых тел.

а — 1-бромнафталин; *б* — стекло (флинт тяжелый); *в* — сероуглерод; *г* — стекло (флинт бариевый).

тельно, отражается во всевозможных направлениях, т. е. рассеивается (фиг. 5.13). Степень этого отражения зависит от угла, под которым свет падает на поверхность, как было показано на фиг. 5.3. Остальной свет проходит сквозь поверхность материала внутрь. Количество света при любом данном угле зависит как от показателя преломления самого материала, так и от показателя преломления внешней среды. На фиг. 5.3 была показана кривая для случая отражения света от полированного стекла (показатель преломления 1,5) в воздухе. Закон, согласно которому происходит это отражение, гласит, что часть отраженного света будет тем больше, чем больше угол между направлением падающего света и перпендикуляром к поверхности и чем больше отношение показателей преломления двух сред. Для большинства типов стекла в воздухе это отношение лежит в пределах от 1 до 1,5. Однако показатели преломления всех материалов меняются с изменением длины волны света. Это свойство называют дисперсией материала. Кривые, характеризующие

зависимость показателя преломления от длины волны для различных материалов, показаны на фиг. 5.14. Из рассмотрения этих кривых следует, что можно подобрать жидкий (например, сероуглерод) и твердый (например, один из видов стекла) материалы, имеющие одинаковый показатель преломления только при одной какой-нибудь длине волны. Если кусочки такого стекла поместить в жидкость и направить на них луч света, то при той длине волны, при которой материалы имеют одинаковый показатель преломления,



Фиг. 5.15. Кривые пропускания светофильтров Христиансена, состоящих из частиц боросиликатного стекла, погруженного в смесь бензола и сероуглерода при различной концентрации этих веществ. (McAlister E. D., *Smithsonian Misc. Collections*, 93, № 7, 4.)

отражения не будет наблюдаться; при этом будет наблюдаться все увеличивающееся отражение на участках спектра, где показатели преломления различны. Свет, пропущенный через такую комбинацию, следовательно, состоит из относительно узкого участка длин волн, а почти весь остальной свет рассеивается. Кривые пропускания для серии таких светофильтров показаны на фиг. 5.15.

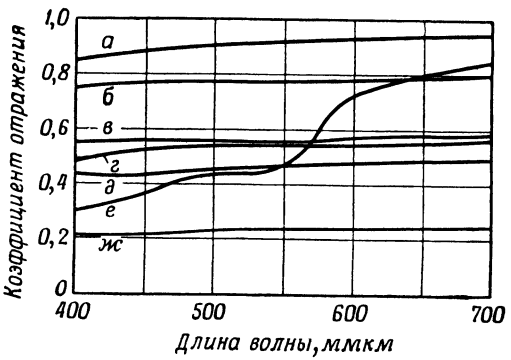
Этот эффект играет иногда большую роль в образовании цвета пигментами и аналогичными материалами, распределенными в масле или какой-либо другой подобной среде. Количество света, отраженного частицами, определяется в этом случае относительными показателями преломления.

Отражение света металлическими поверхностями

Избирательное отражение света наблюдается также для металлических отражающих поверхностей. На фиг. 5.16 приведены кривые отражения для некоторых обычных металлов и графита. Следует помнить, что форма многих из этих кривых сильно изменится, если поверхность металла не будет чистой и хорошо отполи-

рованной. Наличие на поверхности металла тонкой оксидной пленки может значительно изменить цвет отраженного света. Это особенно заметно на латуни и меди. Все кривые приведены для чистых поверхностей.

Большинство обычных неметаллических предметов отражает свет неселективно. Такие поверхности, как стекло, масляные краски, лаки и различные сорта полированного дерева, всегда отражают определенную часть света, не изменяя его состава. Только та



Ф и г. 5.16. Кривые отражения.

а — серебро; *б* — алюминий; *в* — сталь; *г* — хром; *д* — молибден; *е* — медь; *ж* — графит.

часть света, которая проходит через поверхность и снова отражается, претерпевает изменение распределения энергии и, следовательно, изменяет свой цвет. Однако для некоторых неметаллических материалов характерно селективное отражение света от их поверхности, поэтому про эти материалы говорят, что они имеют «металлическое отражение». Между прочим, интересно упомянуть, почему одни материалы обладают селективным отражением, а другие — нет. Как уже отмечалось, степень отражения в значительной мере зависит от показателя преломления. Отмечалось также, что показатель преломления изменяется в зависимости от длины волны света. Если одновременно принять во внимание оба эти фактора, то станет очевидным, что все поверхности должны обладать некоторым селективным действием. Однако степень различия зеркального отражения света различных длин волн у обычных материалов настолько мала, что нет необходимости здесь ее рассматривать. Для практических целей мы можем принять, что селективное действие не наблюдается, если только не предпринято специальных мер для создания особых условий, как, например, при получении светофильтра

Христиансена. Так как металлы имеют исключительно высокие показатели преломления, степень отражения ими света соответственно очень сильно меняется с изменением длины волны. Таким образом, наблюдается отчетливо выраженное селективное действие, особенно у таких металлов, как медь и золото. Однако существует небольшое число материалов, у которых показатель преломления изменяется достаточно быстро. В тех случаях, когда какой-либо материал значительно больше поглощает свет с одними длинами волн, нежели с другими, т. е. когда он имеет так называемую полосу поглощения на некотором участке спектра, на этом же участке спектра резко изменяется показатель преломления. Если изменение показателя преломления достаточно велико, свет на этом участке спектра отражается значительно сильнее, чем в остальной части спектра. Такое явление наблюдается у многих красителей, находящихся в твердом состоянии. Краситель фуксин, например, очень сильно поглощает свет зеленой зоны спектра, а в твердом состоянии в отраженном свете выглядит ярко-зеленым. Однако такое явление наблюдается относительно редко (за исключением металлов и некоторых красителей). Обычно при отражении света внешней поверхностью объекта не наблюдается заметного изменения спектрального распределения энергии отраженного света по сравнению с падающим.

Преломление, дифракция и интерференция

Ради полноты картины следует отметить, что имеются три других способа, с помощью которых может быть изменено распределение энергии света без избирательного поглощения или отражения — преломление, дифракция и интерференция. Преломление света на поверхности, зависящее от длины волны (дисперсия света), используется для получения спектра с помощью призм, рассмотренного в гл. II. Различные цвета бриллиантов и других граненых камней также обусловлены преломлением света. Эти драгоценные камни просто образуют маленькие спектры высокой интенсивности. При этом наблюдатель в каждый данный момент видит только часть спектра. Благодаря преломлению лучей света в каплях дождя образуется обычная радуга. Объяснение образования различных цветов при явлениях дифракции и интерференции выходит за пределы данной книги, но сами эти *явления* можно описать. Рассмотрим сначала явление интерференции.

Свет можно считать состоящим из волн, распространяющихся с большой скоростью во всех направлениях от источника света. Предположим, что некоторый источник испускает свет только одной длины волны и что имеется другой источник света, *точно* подобный

первому, который можно перемещать относительно первого[1]. При распространении световой волны совершаются колебания относительно среднего положения, повторяющиеся с частотой, зависящей от длины волны. Если свет из обоих источников достигает некоторой точки пространства таким образом, что оба колебания совпадают по фазе, то интенсивность света в рассматриваемой точке сильно увеличится. Если же один из источников света расположен таким образом, что в некоторой точке колебания его по фазе не совпадают с колебаниями световой волны первого источника, то эти две волны гасят друг друга либо частично, либо полностью. Очевидно, этот эффект может создать видимое изменение белого света только при особых условиях, так как белый свет является смесью волн различной длины. Эти условия, однако, имеются в ряде хорошо известных случаев. Они используются при построении многих приборов.

Если на поверхности гладкого прозрачного материала процарапать большое число параллельных линий (в некоторых случаях до 1600 на 1 *мм*) и направить на него пучок параллельного света, то при прохождении света через материал на каждом штрихе наблюдается дифракция. Практически каждый промежуток между царапинами становится новым линейным источником света. Если за так называемой решеткой поместить экран, то на нем наблюдается целая серия спектров, каждый из которых по своей природе подобен спектру, образуемому призмой. Причиной возникновения спектра является разность расстояний от любой точки экрана до различных источников света, образованных благодаря наличию штрихов. Свет от любой данной точки в одной зоне длин волн усиливается, а во всех других ослабляется или гасится благодаря интерференции. (Читатели, интересующиеся теорией вопроса, могут обратиться к работе [4].) Спектр, образованный такой дифракционной решеткой, обладает практически линейной дисперсией, т. е. одинаковым интервалам длин волн соответствуют равные расстояния вдоль спектра. Поэтому достаточно точно определить длину волны только для двух точек спектра, чтобы получить возможность с такой же точностью рассчитать положение в спектре излучений всех других длин волн. Такая возможность отсутствует в призматическом спектре. Линейность шкалы длин волн является ценным свойством оптических приборов с дифракционными решетками.

. В природе многие объекты имеют линейную структуру, благодаря чему могут образовываться дифракционные спектры и, следовательно, могут наблюдаться яркие цвета, меняющиеся при

[1] Для возникновения явления интерференции необходимо, чтобы источники света были бы когерентны, т. е. имели строго совпадающие по времени фазы излучения. Для двух независимых источников это условие не может быть выполнено.— *Прим. ред.*

изменении положения головы наблюдателя относительно объекта. Радужный цвет крыльев некоторых видов жучков и бабочек объясняется именно этим явлением, хотя многие из них обладают металлическим отражением. Дифракционные цвета можно также наблюдать, рассматривая источник света через птичье перо, кусок тонкой ткани и почти через любой другой предмет с регулярной структурой.

С рассмотренными явлениями связаны, но образуют совершенно самостоятельную группу так называемые интерференционные цвета. Когда луч света падает на прозрачную среду, наблюдаются два явления: отражение света от поверхности и проникновение его внутрь среды. Часть света, проникшего в среду, отражается от внутренней поверности ее, причем если среда имеет небольшую толщину, то направление отраженного света изнутри будет совпадать с направлением света, отраженного от наружной поверхности. Если толщина материала такова, что разность хода световых лучей составляет половину длины волны (или любое *нечетное* число половин длины волны), то два этих луча будут гасить друг друга точно так же, как это было описано выше. Если окажется, что разность хода лучей такова, что для некоторых длин волн наблюдается усиление света, то будет иметь место более сильное отражение света этих длин волн. При прохождении света через несколько таких слоев наблюдается сильное отражение света одной длины волны. Такой эффект является причиной исключительно ярких цветов сверкающих опалов и других ярко окрашенных кристаллов[1].

Таким образом, нами перечислено шесть главных явлений, благодаря которым возникает ощущение цвета вследствие избирательного изменения распределения энергии света: отражение, поглощение, пропускание, дисперсия, дифракция и интерференция. Это — физические причины всех изменений распределения энергии света, излучаемого источниками. В любом наблюдаемом на практике случае возникновение цвета обычно является результатом одновременного действия нескольких явлений. В связи с этим очевидно, что цвет предмета зависит как от направления наблюдения, так и от геометрических характеристик источника света (таких, как направление и угол, размеры).

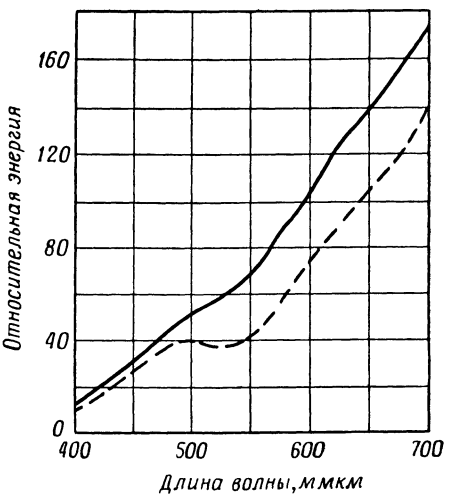
Наиболее распространенным типом цветных поверхностей являются поверхности, состоящие из неизбирательно отражающей внешней поверхности, под которой находится слой материала, избирательно поглощающего свет, и материала, отражающего обратно непоглощенную часть света. Каждый материал действует в общем так же, как светофильтр, помещенный на избирательно отражающей поверхности, в примере, обсуждавшемся в начале главы.

[1] Wood R. W., Physical Optics, 1934, p. 198—199.

В каждом конкретном случае особенности образования цвета могут быть самыми различными, что будет показано на примерах в следующей главе. Однако сначала целесообразно рассмотреть несколько других эффектов, которые могут наблюдаться в поверхностном слое материала.

Глянцевые поверхности

Одним из наиболее обычных отличий цветных материалов является разный характер отражения света внешними поверхностями. Изменения, наблюдаемые у цветных предметов, например у куска дерева, покрытого лаком или воском, нередко настолько разительны, что трудно поверить, что при нанесении этого слоя на предмет не произошло химических изменений состава материала. Причиной указанных изменений цвета являются многократные отражения света под глянцевой поверхностью и устранение *диффузного* отражения его внешней поверхностью предмета за счет покрытия ее лаком. Лучше рассмотреть каждое явление в отдельности.

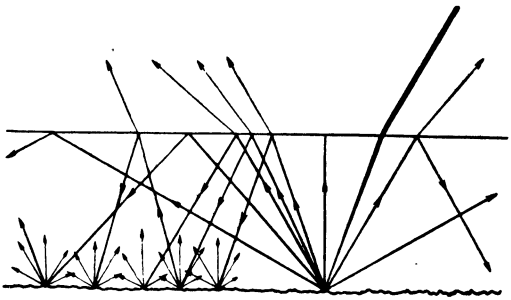


Ф и г. 5.17. Кривые, показывающие действие лака на рассеивающую свет поверхность, обладающую селективным отражением.

Сплошная кривая — характеристика отраженного света до покрытия лаком; пунктирная — после покрытия лаком.

Если внешняя поверхность материала состоит из небольших элементов, расположенных под разными углами, то свет, падающий на эту поверхность, рассеивается вследствие простого отражения. Поэтому отраженный свет можно наблюдать во всех направлениях. Допустим, что такую поверхность покрыли лаком или воском, благодаря чему получили новую гладкую поверхность. Если материал, образующий покрытие, имеет приблизительно такой же показатель преломления, как и покрываемая поверхность, то отражение света от нее будет устранено. Так как при помощи покрытия получена гладкая поверхность, то свет будет неселективно отражаться от нее только в одном направлении. Если глаз наблюдателя расположен по отношению к поверхности таким образом, что в него не попадает свет, отраженный от поверхности, то свет, идущий от поверхности,

расположенной под слоем лака, не будет разбавляться белым светом. Так как наружная, диффузно рассеивающая свет поверхность иногда отражает до 50% падающего света, то ее исключение может вызвать значительные различия в качестве света, попадающего в глаз наблюдателя. Это явление иллюстрируется кривыми фиг. 5.17. При этом, помимо устранения света, рассеянного поверхностью,



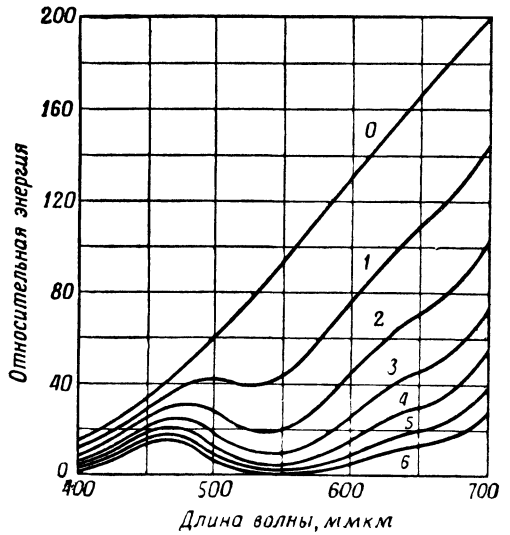
Ф и г. 5.18. Оптическая схема, показывающая, что происходит с лучом света, попадающим на рассеивающую свет поверхность, покрытую тонким слоем лака или воска.

возникает дополнительный эффект благодаря повторному отражению света вниз от внутренней стороны нового покрытия. На фиг. 5.18 показаны некоторые составляющие светового луча, падающего на диффузно рассеивающую поверхность, покрытую прозрачным слоем. Свет, проходящий через наружную поверхность предмета (прозрачный слой лака), попадает на внутреннюю поверхность и после избирательного поглощения рассеивается в различных направлениях. Часть такого света вторично отражается от внутренней поверхности слоя прозрачного лака и снова избирательно поглощается и диффузно отражается. Затем часть этого света опять отражается внутренней поверхностью прозрачного слоя. Этот так называемый процесс многократного отражения очень сильно увеличивает селективное действие цветного материала. Кривые распределения энергии для первых шести последовательных отражений света от цветной поверхности показаны на фиг. 5.19. Очевидно, что по качественной характеристике света, отраженного последним, нагляднее, чем по характеристике света после первого отражения, можно определить, что основная часть энергии избирательно отраженного света приходится на определенный участок спектра. Практически видимый глазом свет является аддитивной смесью излучений с различным распределением энергии, вышедших из слоя после каждого из таких отражений.

Влияние характера освещения на насыщенность цветов предметов

Слева — предмет освещен рассеянным светом, поэтому цвета ненасыщенные; *справа* — используется направленный свет, поэтому цвета имеют бóльшую насыщенность.

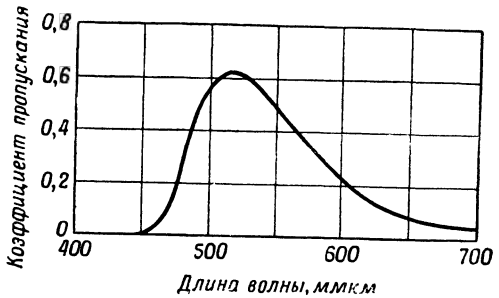
Если слой прозрачного покрытия также окрашен, то наблюдается еще более значительное увеличение насыщенности цвета. Рассмотрение вопроса о преобразовании света такой поверхностью является хорошим введением к описанию влияния толщины слоя материала на его цвет, поэтому разберем этот пример более подробно. Предположим, что в вышеприведенном примере 25% света,



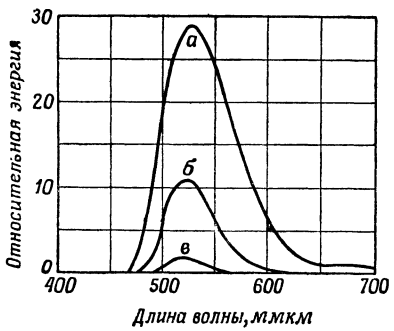
Ф и г. 5.19. Характеристики света лампы накаливания после ряда последовательных отражений от селективно отражающей свет поверхности.

диффузно отраженного от нижней поверхности, снова отражается вниз верхней поверхностью слоя и что слой, нанесенный на поверхность, имеет селективное поглощение, а диффузно рассеивающий свет слой, находящийся под ним, не обладает селективными свойствами. Это подобно случаю нанесения цветного прозрачного слоя на белую поверхность, диффузно отражающую свет. Каждый раз, когда свет проходил бы через этот слой, наблюдалось бы его избирательное поглощение. Пусть кривая пропускания этого слоя имеет вид, как показано на фиг. 5.20. Как только свет достигнет гладкой поверхности слоя и отразится от нее, он дважды пройдет через этот слой. При каждом прохождении света через слой часть его поглощается (кривая фиг. 5.20). Кривые для второго, четвертого и восьмого прохождений света через слой показаны на фиг. 5.21. Если каждый раз от верхней поверхности отражается 25% света, то такое же количество, или $^1/_4$ света, пройдет через слой два раза;

$^1/_4 \times {}^1/_4$, или $^1/_{16}$, часть пройдет четыре раза; $^1/_{16} \times {}^1/_4$, или $^1/_{64}$, пройдет шесть раз и т. д. Результат первых четырех двойных прохождении света через слой приведен на фиг. 5.22. Пунктирная кривая, нанесенная для сравнения в том же масштабе, показывает результат

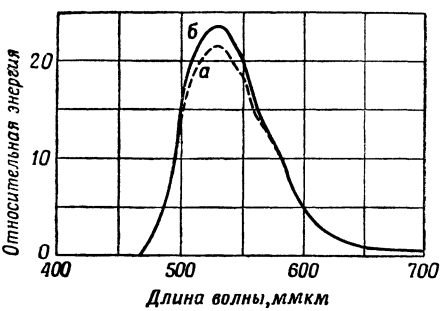


Ф и г. 5.20. Кривая пропускания цветного прозрачного слоя.



Ф и г. 5.21. Распределение по спектру энергии излучения лампы накаливания после прохождения через избирательно действующий светофильтр.

а — 2 раза; *б* — 4 раза; *в* — 8 раз.

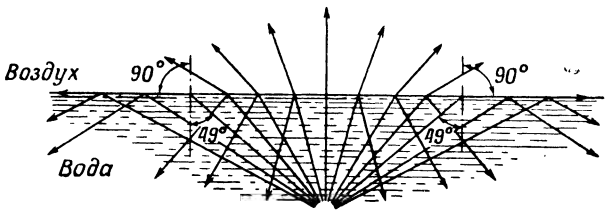


Ф и г. 5.22. Кривые, показывающие результат частичного многократного прохождения света через избирательно действующий на свет слой.

а — однократное отражение; *б* — суммарный результат первых четырех отражений.

однократного прохождения света через слой в прямом и обратном направлениях. В этом случае визуально наблюдается значительное углубление цвета по сравнению с простым удвоением поглощения, которое наблюдалось бы при гладкой поверхности предмета под лаковым слоем. Заметим, что если между цветным слоем и рассеивающей поверхностью имеется воздушная прослойка, например при расположении на поверхности материала светофильтра, подобный эффект не наблюдается. Это можно объяснить на основе поня-

тия о предельном угле отражения. Когда свет падает на гладкую поверхность, то часть его, прошедшая внутрь среды, отклоняется в направлении к перпендикуляру к линии раздела среды, если показатель преломления первой среды меньше, чем второй, или в направлении от перпендикуляра, если показатель преломления первой среды больше, чем второй. Так как показатель преломления



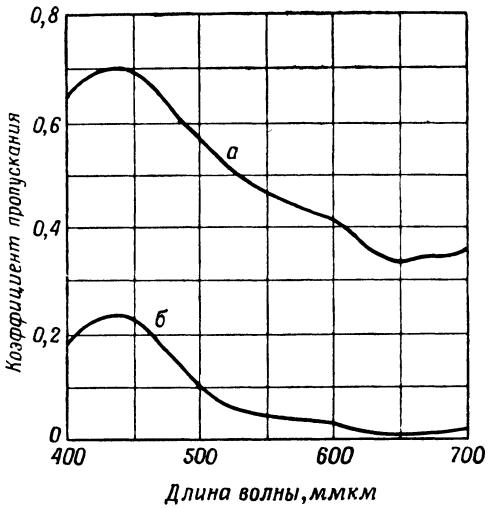
Ф и г. 5.23. Диаграмма, иллюстрирующая явление полного внутреннего отражения.

При угле падения света из воды, большем чем 49°, на границу раздела вода — воздух весь свет, идущий от источника, отражается обратно в воду.

воздуха очень небольшой (практически равный показателю преломления вакуума), то свет, падающий из воздуха на любую поверхность, всегда может войти в нее, хотя для больших углов часть отраженного света может быть значительной. Однако, если свет попадает на поверхность раздела из среды с бóльшим показателем преломления, это правило не применимо. При определенном угле падения свет может отклониться от перпендикуляра настолько сильно, что пойдет параллельно поверхности; при этом часть света, падающая на поверхность под большим углом, полностью отражается внутрь среды (явление полного внутреннего отражения). Это положение проиллюстрировано на фиг. 5.23. Свет, входящий в слой материала, с обеих сторон окруженного воздухом, проходит через него значительно более свободно и с меньшей степенью внутреннего отражения, чем в том случае, когда воздух имеется только с одной стороны. Это особенно справедливо тогда, когда нижняя поверхность рассеивает свет даже в том случае, если он входит в материал в виде параллельного пучка. От верхней поверхности свет отражается под всевозможными углами. Когда две поверхности находятся в плотном контакте без промежутков между ними, про них говорят, что они находятся в оптическом контакте. Свет, отраженный от прозрачной поверхности, находящейся в оптическом контакте с поверхностью, расположенной под ней, сильно отличается от света, отраженного от поверхности, не имеющей такого контакта.

Законы Бугера и Бэра

Рассмотрим случай, когда изменяется толщина слоя материала, селективно поглощающего (но не рассеивающего) свет. Предположим, что имеются два слоя, изготовленных из одинакового материала, но один из них в 4 раза толще другого. Возьмем, например, цветной желатиновый светофильтр и четыре таких же светофильтра,



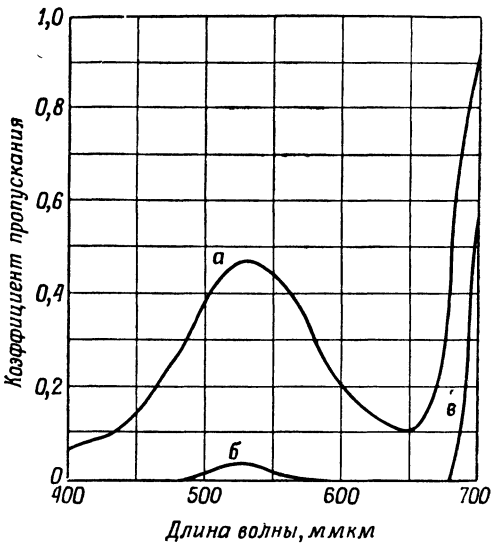
Ф и г. 5.24. Кривые пропускания.

а — при некоторой толщине вещества; *б* — при толщине того же вещества, большей в 4 раза.

находящихся в оптическом контакте. На фиг. 5.24 показаны кривые спектрального пропускания для одного и для четырех слоев. По кривой более тонкого светофильтра можно построить кривую для более толстого составного светофильтра. При длине световой волны 526 *ммкм* пропускание света составляет 50%, т. е. половину. Такое же уменьшение интенсивности света будет происходить в каждом слое. Для четырех слоев оно составит, следовательно, $^1/_{16}$, или $(1/2)^4$, количества исходного света. Таким образом, если пропускание света слоем при некоторой длине волны равно T, а толщина другого слоя в n раз больше толщины исходного слоя, то можно написать, что пропускание слоя толщиной n при этой длине волны равно T^n. Это выражение известно как закон Бугера[1]. Его можно сформулировать следующим образом: результат. наб-

[1] Иногда его называют законом Ламберта.

людамый при изменении толщины цветного прозрачного слоя, будет таким же, как и при прохождении света через соответствующее число тонких слоев, находящихся в оптическом контакте. Важно заметить, что из этого закона следует, что толстый слой окрашенного материала не может иметь такую же кривую пропускания, какую имеет тонкий слой. Допустим, что кривая пропускания прозрачного материала имеет вид *а*, а кривая для большей в 5 раз толщины слоя этого же материала имеет вид *б* (фиг. 5.25). Первый материал, хотя он и пропускает свет всех длин волн, большее количество энергии пропускает в центральной, а не в длинноволновой части спектра. Когда же толщина слоя в 5 раз больше, положение меняется: пропускание света в длинноволновой части спектра больше, чем в центральной. Это вполне обычное явление для красителей и называют его дихроизм, т. е. двухцветность. Это значит, что описанный материал в тонком слое выглядит зеленым, так как он пропускает много энергии в центральной части спектра, а его более толстый слой выглядит красным, ибо он пропускает много энергии в длинноволновом участке.



Ф и г. 5.25. Кривые пропускания материала, селективно пропускающего свет.

а — при некоторой данной толщине; *б* — при толщине, большей в 5 раз.

Эквивалентом закона Бугера для переменных толщин цветного слоя является закон, которым определяется поглощение слоев

постоянной толщины, когда *количество* поглощающего свет материала изменяется. Предположим, что стеклянная кювета с параллельными стенками наполнена водой, в которой растворен краситель. Избирательное действие этого слоя вызвано поглощением света молекулами красителя. Если бы количество молекул красителя в растворе удвоилось, то в 2 раза увеличилось бы и поглощение света — точно так же, как если бы свет был дважды пропущен через слой поглощающего свет вещества. На приведенном примере показана сущность закона Бэра, а именно: влияние изменения концентрации материала, поглощающего свет, в слое данной толщины такое же, как при изменении, аналогичном толщине слоя исходного материала.

Коллоидные соединения

Крайним случаем распределения в некоторой среде вещества, поглощающего свет, является краситель, содержащийся в истинном (молекулярном) растворе. Более часто поглощение света, происходящее под верхней поверхностью предмета, вызывается более крупными частицами. Так как эти частицы увеличиваются от молекул до видимых глазом частиц, то изменяются также причины и характер поглощения света. Если нерастворимое вещество размолоть на частицы столь малые, что они не видны под микроскопом (на частицы с размерами порядка длины волны видимого света), то такие частицы образуют суспензии, т. е. находятся в жидкости примерно так же, как в истинном растворе. Такую дисперсию мелких частиц называют коллоидным раствором, а использованный материал называют коллоидом. Если эти частицы непрозрачные и неметаллические, то наблюдаемое селективное поглощение вызвано главным образом рассеянием света и цвета таких растворов образуют определенные последовательности; при этом цвет зависит только от размеров частиц. Чем больше размеры частиц, тем меньше рассеяние и соответственно короче длина волны наиболее сильно рассеиваемого света. Следовательно, коллоиды с грубыми частицами пропускают весь свет, за исключением света с наиболее короткими длинами волн. Эти растворы кажутся желтыми. При уменьшении размеров частиц пропущенный свет становится оранжевым и, наконец, темно-красным. Это свидетельствует о том, что рассеивается свет со все бо́льшими длинами волн. Если в коллоидном растворе содержатся металлические частицы, то наблюдается другой эффект, называемый эффектом резонанса. Коллоидные растворы золота, серебра и других благородных металлов имеют в спектрах зоны пропускания благодаря тому, что свет, падающий на частицы в коллоидном растворе, поглощается, а затем снова излучается с той же длиной волны, создавая эффект прозрачности раствора. Вероятно, эффект, наблюдаемый со светофильтром Христиансена, может на-

блюдаться и у коллоидов. Благодаря этому эффекту даже в тех случаях, когда в растворе содержатся неметаллические частицы, в спектрах могут наблюдаться зоны пропускания.

Если же в коллоидном растворе частицы прозрачны и имеют определенный цвет, цвет раствора будет характерным для прозрачного вещества, хотя и с несколько видоизмененным эффектом рассеяния цвета. Визуально такие коллоидные дисперсии невозможно отличить от истинных растворов. Однако свойство этих растворов несколько иное, так как они могут не подчиняться закону Бэра. И когда луч света проходит через такой раствор, иногда наблюдается рассеяние света. Затертые в вязкой среде, например масле, частицы, более крупные, чем коллоидные, составляют основу общеизвестных художественных и малярных масляных красок. Эти частицы имеют определенный цвет и нерастворимы в связующем. Вещества, из которых состоят частицы, называются пигментами. Цвет таких пигментов, распределенных в масле, является следствием того, что свет, прошедший через поверхность масла на небольшое расстояние внутрь частицы пигмента, отражается (вероятно, от одной или большего числа частиц) и выходит обратно через поверхность масла.

Подобный же результат имеет место в том случае, если частицы пигмента имеют белый цвет, т. е. обладают диффузным неселективным отражением, но покрыты прозрачным окрашенным веществом — красителем. Свет, падающий на такие частицы, избирательно поглощается слоем окрашенного вещества и диффузно отражается находящимся под ним белым материалом частицы. Такую смесь называют лаком; лаки составляют значительную часть цветных красок. Они имеют особенности, которыми не обладают дисперсии прозрачных материалов: лаки отражают бо́льшую часть попавшего на них света, а также более плотно покрывают поверхность, на которую их наносят. Третьим возможным случаем при получении таких красок является растворение красителя в самом масле. Введенные в масло белые частицы будут отражать свет. Все три рассмотренных случая как по отдельности, так и в сочетаниях наблюдаются у промышленных красок.

Трудно кратко подытожить столь разнородный материал, изложенный в данной главе. Можно лишь сформулировать немногие обобщения.

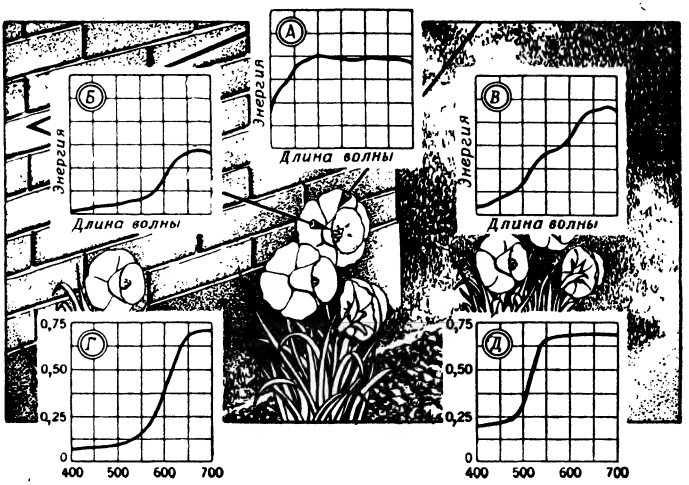
1. Для всех предметов, которые не флуоресцируют, количество отраженного или пропущенного света при любой длине волны всегда *меньше* количества света, падающего на них.

2. Большинство материалов, кроме металлов и некоторых твердых красителей, отражает свет своей внешней поверхностью неселективно.

3. Покрытие диффузно рассеивающей свет внешней поверхности

предмета гладкой прозрачной бесцветной пленкой, например лаком, маслом, воском или водой, сильно увеличивает избирательное действие любого поглотителя света, находящегося под этой поверхностью, за исключением направления, в котором свет отражается зеркально.

4. С увеличением толщины слоя, содержащего поглощающие свет частицы, или с увеличением концентрации таких частиц без



Ф и г. 5.26. Диаграмма, показывающая, как в обычных условиях наблюдения изменяется состав света, попадающего в глаз наблюдателя, из-за избирательного поглощения света различными предметами.

изменения толщины слоя увеличивается избирательное действие слоя, а иногда и сильно изменяется его характер.

5. В общем случае цвет поверхности зависит *от* распределения энергии в излучении источника света и *от* его геометрического положения по отношению к объекту. Однако из этого правила имеется ряд исключений, наиболее важными из которых являются избирательно отражающие свет металлы.

6. *Почти* во всех случаях причиной избирательного действия цветных поверхностей природных объектов на свет различных длин волн является избирательное поглощение света частицами различных размеров — от молекул до частиц, видимых невооруженным глазом. Для частиц относительно большого размера указанный эффект выражен значительно сильнее благодаря многократному отражению света между частицами до выхода его из избирательно поглощающего свет слоя.

7. Из-за крайней сложности пути света обычно невозможно точно предсказать, каким будет избирательное действие на свет двух пигментов, содержащихся в данной рассматриваемой среде.

8. Необходимо всегда четко различать последовательное воздействие на спектральный состав света материалов, избирательно поглощающих свет (субтрактивная смесь), и одновременное сложение (аддитивная смесь) световых потоков с различным распределением энергии.

Фиг. 5.26 иллюстрирует избирательное изменение света цветными объектами. Приведенные кривые показывают спектральное распределение энергии света, идущего по направлению стрелок. Процесс происходит следующим образом: дневной свет, распределение энергии по спектру которого представлено кривой *А*, падает на красную кирпичную стену, кривая отражения которой обозначена буквой *Г*, и на желтый цветок, кривая отражения которого обозначена буквой *Д*. Отраженный от стены свет после избирательного поглощения имеет распределение энергии, характеризующееся кривой *Б*. Часть света от стены попадает на цветок, избирательно поглощается им и снова отражается. Этот свет образует аддитивную смесь с дневным светом, непосредственно попадающим на цветок, избирательно поглощается и снова отражается. Кривая аддитивной смеси этих двух световых потоков обозначена буквой *В*. Влияние цвета стены придает этому излучению несколько оранжевый оттенок. Если бы цветок был изолирован от стены, этот цвет был бы желтым.

ГЛАВА VI

Основы физики цвета

Деление науки о цвете на три составные части — физику, психофизику и психологию — уже обсуждалось в гл. I. В гл. II—V были кратко рассмотрены вопросы цвета с физической точки зрения. Несмотря на весьма краткое изложение, все же приводилось достаточно данных, чтобы читатель мог понять, что то, что мы называем «цветом» некоторого объекта, не является чем-то неизменным в полном смысле этого слова, если рассматривается с точки зрения качества света, попадающего в глаз. В последующих главах будет показано, почему цвет объекта обычно считают постоянным, и как следствие этого будет установлено, что распределение энергии излучения, попадающего в глаз, часто имеет менее важное значение, чем работа мозга. Этот дополнительный факт затрудняет понимание вопроса, потому что становится соблазнительным в каждом конкретном случае обвинять в непонятных эффектах или только глаз, или только качество света. Изучающий этот вопрос хочет знать, что является более важным в формировании ощущения цвета — глаз или качество света. Поэтому кажется целесообразным, прежде чем рассматривать работу глаза и мозга при восприятии цвета, просуммировать всю информацию, которую возможно получить с чисто физической точки зрения.

Цвет не определяется только физикой излучения или психологией восприятия; он определяется тем и другим одновременно. Как невозможно только при помощи физики предопределить, как будет восприниматься данное распределение энергии, точно так же психология не может предопределить цвет субтрактивной смеси. Лишь физика и психология вместе могут решать такие вопросы. В решении таких и подобных задач и заключается цель науки о цвете.

В этой главе будет рассмотрен цвет в таких аспектах, с какими мы сталкиваемся при восприятии цвета в повседневной жизни. Много неясного в вопросе о восприятии цвета связано с тем, что люди не рассматривают цвет критически. Мы обычно полагаем, что цвет — это то, что мы о нем думаем, причем свои предположения мы не проверяем. Можно надеяться, что эта глава

заставит некоторых читателей подойти к вопросу о цвете более осторожно. Можно быть уверенным, что, сделав такую попытку, многие будут удивлены тем, что они видят.

Освещение в тенях

Целесообразно начать изучение вопроса с рассмотрения освещения в тенях и качества света, попадающего в глаз от затененных поверхностей. Если объект освещен точечным источником света, то сзади объекта имеется пространство, в которое свет непосредственно не может проникнуть.

Область тени должна освещаться откуда-то со стороны. Свет в область тени *может* попасть либо от другого первичного источника, либо от вторичного источника света, например от объекта, отражающего свет. Во всяком случае обычно мало сходства в спектральном составе света, достигающего объекта непосредственно, и света, освещающего тени; возможно, здесь следует указать, что если свет совсем не попадает в область теней, объекты, там находящиеся, не будут видимы глазом. Подобным образом, если имеются два источника света малых размеров, создающих тени от одного и того же объекта, часть каждой тени будет освещена другим источником света, а также будет существовать область наложения теней, которая не освещается ни одним из источников света. Если эти источники света не будут чрезмерно отличаться по интенсивности, то будут возникать двойные тени.

Менее очевидна часто встречающаяся ситуация, когда из двух источников света один малый, а другой большой. В этом случае малый источник света образует резкие тени, в то время как большой теней не образует, в результате чего область тени может быть полностью освещена большим источником. Подобное положение наблюдается при дневном освещении, когда солнце и небо являются двумя источниками света. То же самое имеет место при внутреннем освещении помещения, где свет, отраженный стенами, или специально освещенный потолок образуют второй источник света. В этих случаях освещение тени практически может меняться от нуля до величины, немного меньшей, чем освещение от комбинации двух источников. Последний случай имеет место тогда, когда свет от малого источника настолько слаб по сравнению со светом от большого, что заметной тени не образуется. С точки зрения физики цвета выявление качества света, попадающего в область такой тени, часто является трудной задачей. Нужно вспомнить, что если объект посылает достаточное количество света к глазу за счет отражения, в результате чего этот объект становится видимым, то такое же количество света он посылает и во многих других направлениях. Если же объект расположен вблизи тени другого объекта

и нет никаких препятствий, он посылает свет и в область этой тени. Итак, если имеется только один источник света, то весь свет, освещающий тени, обусловлен близ расположенными отражающими объектами; если же эти объекты имеют селективно отражающие поверхности, этот свет в общем случае будет цветным. Если различные объекты имеют разный цвет, то освещение тени создается аддитивной смесью излучений от всех этих объектов. Это было бы всегда заметно для глаза, если бы не странное свойство зрения, заключающееся в том, что эти особенности цвета теней оказываются гораздо менее заметными, чем можно было бы ожидать, исходя из качества света, попадающего в тень. Этот вопрос будет детально рассмотрен в гл. XI. Однако предварительно целесообразно рассмотреть физическую сторону явления применительно к некоторым обычным случаям.

Дневной свет

Наиболее обычным случаем, когда мы имеем дело с двумя или несколькими источниками света, является дневной свет. Когда светит солнце, всегда имеется по крайней мере два источника света, действие которых следует учитывать: солнце и небо. Интенсивность прямых солнечных лучей в полдень ясного дня мало изменяется в течение года, если измерения производить на поверхности, перпендикулярной лучам солнца. Обычно считают, что «ясный день» — это когда хорошо видно вдаль и небо темно-голубое или синее, при этом освещенность, создаваемая солнцем, приблизительно неизменна в течение всего года (80 000—110 000 *лк*). Однако, если освещенность измерять на поверхности, не перпендикулярной к солнечным лучам, а параллельной земле, изменение ее будет значительно больше; в северных районах США в течение года освещенность изменяется более чем в 3 раза. Если день не совсем ясный, освещенность от прямых солнечных лучей может легко уменьшиться в 5 раз. Подобные и еще меньшие величины освещенности бывают перед заходом солнца даже в ясные дни. Таким образом, освещенность, создаваемая солнцем, непостоянна и изменяется в соотношении примерно 5 : 1.

Освещенность, создаваемая небом, зависит не только от *его* яркости. Небо в ясный безоблачный день представляется полусферой, имеющей более или менее постоянную яркость и темно-голубой цвет. Если в этих условиях солнце создает за объектом тень, то она освещается небом, и освещенность ее составляет примерно $^1/_4$ освещенности, создаваемой солнцем на объекте. Естественно, что цвет этого света по сравнению с солнечным излучением такой же голубой, как и цвет неба при непосредственном наблюдении его глазом. Действительно, цвет тени на белой поверхности оказывается близким

к цвету неба. Это можно обнаружить прямым сравнением, например, с помощью двух зеркал или другим подобным способом.

Если на небе имеются отдельные облака, то создаются два эффекта. Во-первых, часть неба экранируется облаками и, во-вторых, эти облака, если они отражают свет солнца, светят смесью солнечного света с голубым. При таких условиях освещенность в тенях может значительно возрасти, а цвет станет светло-голубым. В крайнем случае, когда на небе много отдельных облаков, освещенных солнцем, освещенность и цвет в тенях могут быть почти *такими же*, как при прямом солнечном освещении. Если между солнцем и объектом имеется дымка, то освещенность, создаваемая прямыми солнечными лучами, уменьшается, а освещенность тени увеличивается. По мере того как плотность дымки будет возрастать, может наступить такое положение, когда солнце будет полностью закрыто облаками и тени исчезнут. Освещенность в такие дни может меняться от сравнительно большой, например 30 000—40 000 *лк*, до очень малой — порядка 1000 *лк*. Цвет излучения в облачный день также может меняться в широких пределах в зависимости от метеорологических условий. Если прямые солнечные лучи закрыты тяжелыми облаками, а остальная часть неба затянута легкой дымкой, то свет может быть почти таким же голубым, как и цвет неба. Аналогичные условия освещения создаются ежедневно при восходе и заходе солнца. Если небо закрыто плотным туманом и солнца не видно, то свет, достигающий земли, может быть смешанным, т. е. иметь такой же цвет, как и солнечные лучи вне земной атмосферы. При восходе или заходе солнца и некоторой облачности освещение создается излучением, имеющим розоватый оттенок.

Таким образом, не только свет, падающий непосредственно на объект, но в еще большей степени свет, освещающий тени, меняется днем в очень широких пределах. Нужно отметить, что мы рассматривали только такие случаи, когда свет неба не экранировался другими объектами и когда никакие другие объекты не отражали свет в область теней. При других условиях дневное освещение становится еще более сложным. Освещенность в тенях может достигать исключительно малых значений, например в лесу, куда солнечный свет проникает через небольшие просветы в листве. При этих условиях практически весь свет, который попадает в тени, исходит от объектов, отражающих солнечный свет, и в общем имеет такой же цвет, что и сами объекты. Если в тень попадает свет неба и отраженный солнечный свет, то суммарный цвет в тени будет определяться аддитивной смесью этих двух излучений.

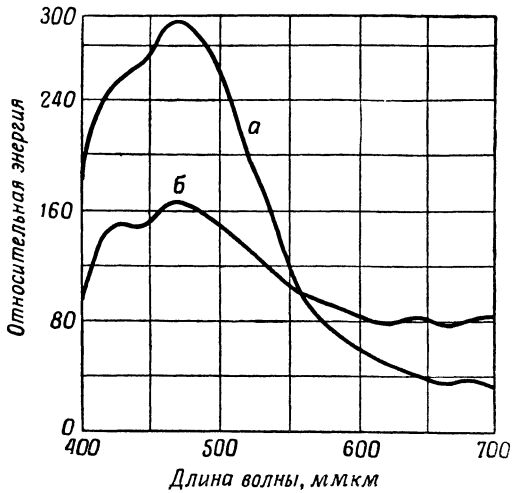
Таким образом, и цвет, и интенсивность излучения, создающего освещенность в тени, могут значительно меняться, причем величина максимальной освещенности определяется интенсивностью прямого солнечного света. Обычно на открытых местах тени бывают

голубыми, однако если вокруг имеются цветные отражающие поверхности, например кирпичные дома или деревья, или если погода недостаточно ясная, то голубой цвет не будет доминирующим. Из этих двух переменных — цвет и интенсивность — изменение интенсивности более заметно. Отношение интенсивности прямого солнечного света плюс свет неба, падающий на объект, к свету неба плюс отраженный свет в тени может меняться от 1 : 1 в облачный день, когда тени отсутствуют, до исключительно высоких значений, когда детали в тени неразличимы из-за слишком яркого отраженного солнечного света. Таким образом, контраст света и тени при дневном освещении является, вероятно, наиболее сильно изменяющейся величиной. Цвет тени меняется меньше. Теоретически тень может быть любого цвета, но обычно излучение, освещающее тень, содержит значительное количество голубого. Несколько меньше меняется цвет прямого освещения, который может быть смесью солнечного света (меняющегося от белого в полдень через желтый и оранжевый к красному при заходе солнца) в любой пропорции с голубым цветом неба. Последнее говорит о том, что прямой свет может быть белым, желтым, оранжевым, красным и розовым, но обычно бóльшую часть дня он белый.

Отражение от поверхности

В дополнение к этим изменениям цвета и интенсивности геометрический характер дневного освещения может изменяться в широких пределах. Прямой солнечный свет, проникающий в окно, практически состоит из параллельных лучей (максимальный угол 0,5°). Если этот свет падает на полированную поверхность селективного объекта, то отраженный свет будет иметь *максимальную* селективность. В другом крайнем случае, если этот объект помещен на открытом месте в облачный день, полированная поверхность со всех положений наблюдения будет отражать небо. В этих условиях свет, идущий от объекта, аддитивно смешивается с большим количеством зеркально отраженного света неба и объект будет иметь *минимальную* селективность отраженного излучения. Для оценки возможной величины этого эффекта на фиг. 6.1 приведены две расчетные кривые. Между этими крайними случаями лежат все возможные вариации естественного освещения, например освещенные солнцем облака, дымка и ясное голубое небо. Очевидно, не стоит рассматривать каждую из них в отдельности, но два случая следует рассмотреть внимательно. В природе большинство объектов имеет поверхности, отражающие свет более или менее зеркально. Отражение от таких поверхностей быстро возрастает, если угол, под которым они освещаются и наблюдаются, уменьшается. Любой объект, например лист, освещаемый солнечным светом, может до-

статочно интенсивно избирательно отражать солнечный свет, если смотреть на него в плоскости, перпендикулярной к его поверхности. Если же лист освещается облачным небом, отраженный свет будет мало зависеть от селективности самого листа вследствие большой яркости зеркально отраженного излучения источника света. Если



Ф и г. 6.1. Кривые распределения энергии излучения, отраженного от голубого объекта с глянцевой поверхностью.

а — при освещении прямым солнечным светом;
б — при освещении небом, полностью затянутым облаками.

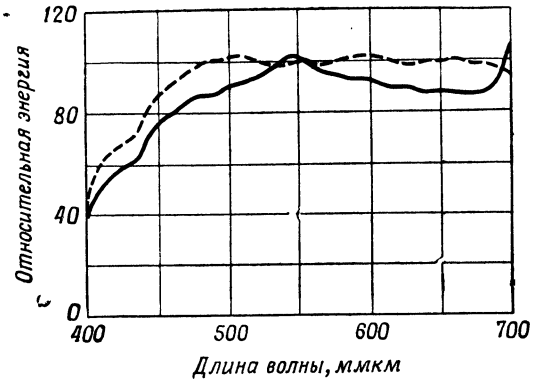
же наблюдение вести в направлении угла зеркального отражения листа, то совсем не обнаруживается селективность, так как лист будет отражать такой свет, какой упал на него. Если свет исходил от красного кирпичного здания, то отраженный свет будет красным; если отражается свет голубого неба, он будет голубым и т. д. безотносительно к цвету самого листа.

Выражение «дневной свет», очевидно, следует понимать скорее как «неискусственный свет», чем как описание действительных условий освещения для некоторого времени и места. Определение действительного качества света на открытом воздухе в любом заданном месте требует тщательного изучения всех условий.

Освещение внутри помещений

Возможно, что изложенные выше соображения в большей степени справедливы применительно к освещению внутри помещений независимо от того, о каком свете идет речь — о естественном, иду-

щем извне, или об искусственном. В этих условиях прямой свет, падающий на объект, т. е. свет, образующий тень, может быть почти любого качества. В тени свет может быть таким же, а может быть и совершенно иным. В комнате с одним большим окном, перед которым растет дерево с зеленой кроной, в солнечный день практически все предметы освещены зеленым светом. Кривая распределения



Ф и г. 6.2. Солнечный свет, отраженный от обычного зеленого листа, с учетом диффузной и зеркальной компонент (сплошная кривая); солнечный свет (пунктирная кривая).

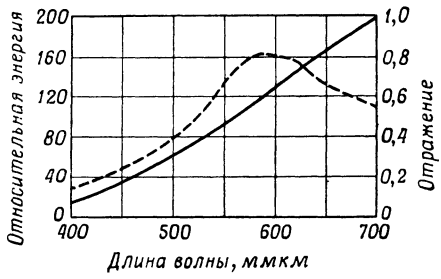
энергии такого света может почти полностью соответствовать кривой распределения солнечного света, отраженного листьями (фиг. 6.2). С другой стороны, если солнечный свет проникает в окно и падает на яркий красный ковер, все другие предметы в комнате освещены *красным* светом того же оттенка, что и ковер. Для комнаты зеленое дерево или красный ковер являются как бы *первичными* источниками света. Не существенно, что этот свет был отражен поверхностью. Важно, что весь свет, попадающий на другие объекты, обладает качеством этого источника. Таким образом, качество света, падающего на объект, определяется суммой различных излучений, попадающих на этот объект от *всех* окружающих его предметов, и каждый из этих предметов можно рассматривать как самостоятельный источник.

Учитывая вышеизложенное, следует рассмотреть более подробно причины, вызывающие изменение качества отраженного света. В частности, очень важно рассмотреть различное качество света в сравнительно небольшой комнате, освещенной одним источником света, представляющим собой довольно яркую лампу, верхняя часть ко-

Зеркальное отражение света от поверхности листьев водяных лилий; все листья имеют цвет голубого неба (*верх*).

В другом направлении нет поверхностного отражения и видны различные цвета водяных лилий (*низ*).

торой открыта, благодаря чему свет падает не только прямо на предметы, но и на стены и потолок. Нет необходимости подробно рассматривать прямой свет; его интенсивность уменьшается с увеличением расстояния от лампы по закону обратных квадратов и может стать весьма малой на сравнительно небольшом расстоянии. Свет падает на довольно большую площадь потолка, и, если потолок белый и диффузный, он будет отражать во все углы комнаты свет такого же цвета, как и излучаемый источником. Поскольку потолок является большим источником, освещенность будет уменьшаться с расстоянием значительно медленнее, нежели следует по закону обратных квадратов. Практически отраженная освещенность может очень мало меняться по длине всей комнаты. Это справедливо и для света, падающего на стену, с тем важным исключением, что качество отраженного света будет зависеть от селективного действия стены.



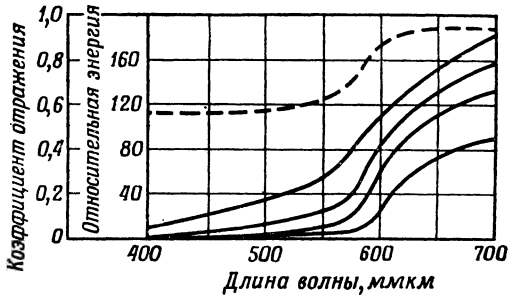
Ф и г. 6.3. Кривые, характеризующие отражение света желтой стеной (пунктирная) и спектральное распределение энергии излучения лампы накаливания (сплошная).

Допустим, например, что стена темно-желтая и характеризуется кривой отражения, приведенной на фиг. 6.3. Здесь же приведено распределение энергии источника света. Свет, падающий на предмет в середине комнаты, будет состоять в основном из света, идущего от стены и потолка, а не непосредственно от лампы; этот свет будет значительно более желтым по сравнению со светом самого источника. Столь простой вывод можно несколько усложнить. Во-первых, возможно, что вблизи объекта расположена другая селективно отражающая поверхность; во-вторых, возможно многократное отражение света между стенами комнаты. В принципе оба эффекта идентичны, но несколько различаются по своим результатам.

Если сразу за объектом находится большая селективно отражающая поверхность, то свет от нее будет попадать в тень сзади объекта. Если, например, поверхность красная, свет в тени будет складываться из желтого, создаваемого стенами и потолком, плюс красное излучение, отраженное от красной поверхности.

При отсутствии большой поверхности, освещающей тень, в данную точку предмета попадает свет, отраженный от других точек комнаты. Обычно наибольшими поверхностями являются потолок и стены. Свет, падающий на одну стену, отражаясь от нее, попадает

на другую, снова отражается и попадает на третью и т. д. Даже если стены окрашены в довольно светлые тона, то в результате таких многократных отражений свет становится значительно более насыщенным. Кривые на фиг. 6.4 показывают качество искусственного света, отраженного от стены, окрашенной в кремовый цвет



Ф и г. 6.4. Кривые, характеризующие относительное распределение энергии излучения лампы накаливания после 1, 3, 5 и 10-го многократных отражений от кремовой поверхности.

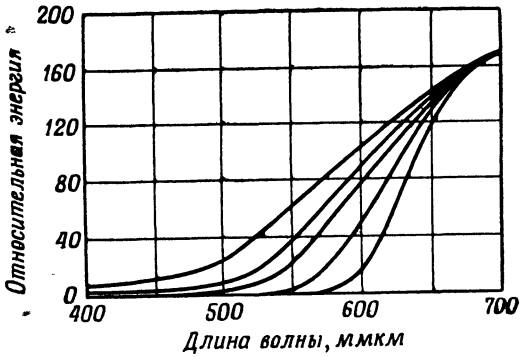
Сплошными кривыми показано, как отраженный свет становится слабее и краснее по мере увеличения количества отражений. Пунктирная кривая характеризует отражение поверхности.

(пунктирная кривая), и качество света после 1, 3, 5 и 10-го многократных отражений. Очевидно, что происходит значительное увеличение селективного действия. Свет, попадающий на любой объект в такой комнате, определяется суммой излучений, претерпевших все эти отражения, с учетом их относительных интенсивностей. Этот эффект играет важную роль при визуальном наблюдении цвета теней в комнате. Он также является важным фактором при определении видимого цвета самих стен. Хорошо известно, что цвет краски или обоев становится значительно более интенсивным *после* того, как они будут нанесены на стену, по сравнению с их цветом на образце, что является главным образом следствием эффекта многократных отражений.

Заканчивая рассмотрение этого вопроса, следует заметить, что специфическая красота многих объектов является следствием этого эффекта. Если внутренняя поверхность какого-либо объекта, например бутыли или ящика, окрашена, то многократные отражения делают цвет более насыщенным. Вид объекта значительно меняется и зависит от угла, под которым свет проникает в отверстие. Этот эффект особенно интересен на таких объектах, как позолоченные серебряные кубки. Золото хорошо отражает свет, обладая в то же время большой селективностью отражения. Если бокал плавно

суживается, можно наблюдать многократные отражения высокого порядка. В результате цвет золота становится более насыщенным, достигая иногда темно-красного. Кривые для 1, 3, 5, 11 и 19-го отражений от золота приведены на фиг. 6.5.

Таким образом, условия освещения в комнате не могут быть определены типом источника света или же указанием на то, что



Ф и г. 6.5. Относительное распределение энергии после 1, 3, 5, 11 и 19-го многократных отражений излучения лампы накаливания от золотого зеркала.

Верхняя кривая показывает качество света после 1-го отражения, а нижняя — после 19-го. Все кривые приведены к одному максимуму.

освещенность соответствовала дневному свету, проходящему через окно. Свет, падающий на каждый отдельный предмет, и свет в его тени следует рассматривать раздельно. Внимательное изучение часто показывает, что качество света очень далеко от того, которого можно было ожидать. Примером такого сложного случая может служить часто наблюдаемая ситуация, когда в окно комнаты проникает дневной свет, а темные углы комнаты освещаются искусственным светом.

Читатель может обнаружить некоторые расхождения между вышеизложенными соображениями и своим повседневным опытом. Рассмотренные выше примеры приводились умышленно, чтобы обратить внимание на то, что подобные расхождения существуют. Ничто не было преувеличено, хотя, разумеется, в каждой конкретной ситуации некоторые факторы могут и не иметь места. Фактически в освещенной комнате почти невозможно расчетным путем определить качество света в любой данной точке; оно может изменяться в очень широких пределах. Как правило, эти различия наблюдатель замечает лишь случайно.

Атмосферное рассеяние

При рассмотрении условий освещения объектов на открытом воздухе возникает вопрос о влиянии атмосферного рассеяния на внешний вид объектов. Рассмотренные ранее первичные и вторичные источники света имели определенное положение и размеры. Однако существует важная группа вторичных источников света, которые не имеют ни определенного положения, ни размеров. Их можно рассматривать как объемные источники. К этому случаю относится часто встречающееся в природе рассеяние света частицами, содержащимися в воздухе, известное под различными названиями, например дымка, мгла, туман и снег.

Если в воздухе находятся частицы влаги, то свет отклоняется ими либо вследствие рассмотренного ранее рассеяния, или за счет прямого отражения. Наличие в воздухе этих частиц изменяет свойства света; по сравнению с прозрачным бесцветным веществом атмосфера приобретает такие свойства, которые для жидкости формулируются как «неоднородно рассеивающая», а иногда даже практически «непрозрачная». В связи с тем что такие условия довольно часто встречаются на практике, их, хотя и кратко, следует рассмотреть систематически.

Мы считаем, что в воздухе находится дымка в том случае, когда на отдельные предметы накладывается свет, который кажется как бы находящимся между наблюдателем и удаленными объектами. Цвет этого света обычно имеет голубоватый оттенок вследствие того, что солнечный свет или свет неба рассеивается в воздухе частичками влаги и пыли. Количество света, рассеиваемое данным объемом воздуха, неизменно во всех местах вдоль линии зрения, однако яркость света, видимого наблюдателем *сквозь* дымку, зависит от общего расстояния до удаленной точки, на которую мы смотрим. Следовательно, количество голубого света, *добавляемого* к свету наблюдаемого удаленного объекта, зависит от расстояния до этого объекта. Если темный объект достаточно удален от наблюдателя, он будет казаться голубоватым. При меньших расстояниях и для более светлых объектов добавленный голубой свет будет играть меньшую роль, а для близко расположенных объектов совсем не будет заметным. Следовательно, расстояние до объектов можно оценивать по тому, насколько голубыми они кажутся; этот эффект настолько общеизвестен, что среди художников он получил название «воздушная перспектива». Изображение этого эффекта является стандартным приемом для указания расстояния до объектов в живописи.

Воздушная дымка обладает другой важной особенностью, которую, к сожалению, часто не замечают. Голубой цвет дымки объясняется тем, что она рассеивает световые лучи коротковолнового

диапазона; таким образом, прямой проходящий свет обеднен излучением такого типа. Соответственно от светлоокрашенных объектов, находящихся на среднем расстоянии, до наблюдателя будет доходить меньше коротковолновых излучений, чем в случае, когда воздух прозрачен и чист; теперь эти объекты будут казаться коричневатыми или красноватыми. На бóльших расстояниях этот эффект может быть компенсирован рассеянным светом солнца, а на меньших расстояниях он может не наблюдаться. При наличии дымки светло-желтые поверхности на близком расстоянии могут казаться желтыми, на среднем — оранжевыми, или красноватыми, или красновато-коричневыми и на больших — голубыми.

Когда частицы влаги становятся большими, создаются условия для возникновения так называемого легкого тумана. Это явление отличается от дымки тем, что, поскольку частицы оказываются слишком большими, селективного рассеяния не наблюдается, и поэтому кажется, что с увеличением расстояния на объекты накладывается все больше и больше белого света. На близком расстоянии могут наблюдаться глубоко черные и чистые цвета, но с увеличением расстояния в глаз попадает все больше и больше белого света до тех пор, пока объекты не закрываются равномерной световой завесой. При этих условиях цветовые тона не меняются и все цвета приближаются к белому. Очень плотную дымку мы называем туманом. При этом количество частиц влаги в воздухе бывает настолько велико, что наблюдатель просто не видит объектов даже на сравнительно небольших расстояниях и чувствует себя как бы окруженным светящейся средой. Сходство с дымкой становится заметным только в случае, если сквозь туман будет виден какой-то яркий источник света, например уличный фонарь ночью. В этих условиях наблюдается сильный сдвиг качества света в сторону длинных волн и соответствующий сдвиг цвета к красному.

Снег действует на излучение так же, как легкий туман, поскольку при снегопаде только добавляется белый свет и не появляется селективного пропускания. Иногда белый свет добавляется к свету, идущему от всех объектов, в очень больших количествах. В сильную снежную бурю объекты, расположенные на расстоянии 1,5—3 *м*, могут оказаться совершенно невидимыми, хотя и будет достаточно светло. Часто днем при обильном снегопаде возникает впечатление непрозрачности, но такой же снегопад ночью может оказаться вполне прозрачным.

Аддитивное смешение в природе

Очевидно, что качество света, достигающего глаза, зависит от соотношения излучений разного качества. Подобные случаи уже обсуждались выше. В дополнение только следует сказать, что сущест-

вует большой класс аддитивных смесей, часто встречающихся и в природе, и в повседневной жизни, о которых еще не упоминалось. Сюда относятся случаи аддитивного смешения, которое имеет место, когда эффективная площадь источников света столь мала и расположены они так близко друг к другу, что на глаз неразделимы. В этих условиях свет можно рассматривать как смешанный прежде, чем он достигает глаза, т. е. этот свет действует так, как если бы он испускался однородным источником, имеющим цвет смеси.

В природе этот эффект возникает довольно часто, особенно при наблюдении удаленных ландшафтов. В большинстве случаев красота удаленных холмов объясняется тем, что цвета небольших участков, которые вблизи имеют разную окраску, сливаются и образуют новый цвет. Иногда этот эффект можно наблюдать осенью, если рассматривать листья на деревьях, меняющие свой цвет, с различных расстояний. На некотором расстоянии цвета отдельных листьев сливаются, и мы видим дерево одного цвета. Если расстояние увеличивается, сливаются цвета крон деревьев, и мы видим участки, покрытые лесом одного цвета в отличие от непокрытых лесом участков другого цвета.

Такое аддитивное смешение можно наблюдать при рассматривании текстильных изделий, в которых за счет переплетения нитей различных цветов образуется рисунок. С малого расстояния видны отдельные нити, но при увеличении расстояния они становятся невидимыми, а виден только рисунок. При еще большем удалении рисунок исчезает. Законы аддитивного смешения цветов хорошо известны, и результаты такого смешения можно точно предсказать, если известны цвета отдельных составляющих. Так, например, некоторые красные и голубые цвета при смешении образуют пурпурный, а красный и зеленый — желтый или оранжевый. В этом отношении аддитивные смеси отличаются от субтрактивных: субтрактивные эффекты могут быть предсказаны только в том случае, если мы знаем спектральное распределение энергии; в отличие от этого аддитивное смешение цветов не зависит от спектрального распределения энергии смешиваемых излучений, а зависит только от их цвета. В этом заключается важнейшее свойство глаза. Еще раз необходимо указать, что аддитивное смешение и субтрактивные эффекты в принципе различны. Однако отсюда не следует, как это часто полагают, что *цвета*, *получающиеся* в результате аддитивного смешения, по своей природе отличны от таких же цветов, получающихся в результате субтрактивных эффектов. Глаз реагирует на спектральное распределение энергии любого попадающего в него света независимо от того, каким образом возникло это спектральное распределение. Если маленькие цветные поверхности удалены настолько, что неразличимы каждая в отдельности, то невозможно сказать, непрерывна по цвету вся поверхность или нет.

Они будут казаться совершенно одинаковыми по цвету, как если бы маленькие поверхности были заменены одной большой поверхностью, имеющей цвет смеси. Однако может иметь место такой случай, когда эти аддитивные смеси будут казаться совершенно различными по сравнению с равномерно окрашенной поверхностью; это происходит на таком расстоянии наблюдения, когда маленькие поверхности кажутся почти (*но не совсем*) слившимися. При этих условиях глаз иногда различает отдельные поверхности, а иногда только цвет смеси. Возникает игра цвета, дающая блеск и мерцание, которыми не обладает равномерно окрашенная поверхность. Эта игра цвета возникает только на расстоянии слияния и является чисто визуальным эффектом, не имеющим никакого отношения к физике явления. При наблюдении с более близкого расстояния будут видны только маленькие цветные поверхности. Например, беспорядочно разбросанные на поверхности красные и зеленые точки будут наблюдаться по отдельности и никаких следов желтого не будет заметно. По мере того как расстояние от наблюдателя увеличивается, становится заметным цвет смеси (обычно появляется желтовато-коричневый цвет, поскольку ярко-желтый не может быть получен таким способом), а красный, зеленый и коричневый цвета будут видны одновременно. На бóльших расстояниях цвет становится совершенно коричневым. Получение коричневого цвета, а не желтого типично для таких смесей. Почти всегда можно найти однородную краску, которая, будучи нанесена на ту же поверхность, будет иметь более яркий цвет по сравнению с тем, который может быть получен при аддитивном смешении. Выигрыш в яркости появляется только на том расстоянии, при котором цвета *не вполне* сливаются.

Изложенные в данной главе соображения являются общими в том смысле, что их можно применить ко всем селективным поверхностям и что они объясняют изменение селективного действия этих поверхностей. Прежде чем перейти к изложению некоторых конкретных примеров, подытожим рассмотренные факты.

Выше было показано, что при некоторых условиях в зависимости от характера освещения, а также от типа поверхности, на которую падает свет, может возникать селективное взаимодействие, степень которого может меняться от некоторого максимума до практически полной неселективности. Было показано, что свойства поверхности всегда играют важную роль в создании цвета. Поверхность может существенно изменяться со временем. Грязь и пыль делают глянцевую поверхность мутной и добавляют белый свет к цвету объекта независимо от характера освещения. Однако дождь может вымыть внешнюю поверхность листьев и изменить их цвет с безжизненного серого на густой зеленый. Наличие дыма, дымки, тумана и т. п. может добавить белый или голубой цвет к цвету

объектов при наблюдении их на значительном расстоянии, а также сдвинуть их цвет в сторону красного. При наблюдении маленьких цветных поверхностей со значительного расстояния они сливаются и образуется совершенно новый цвет. И наконец, при наблюдении малых цветных поверхностей с некоторого промежуточного расстояния могут возникнуть флуктуации их внешнего вида, цвет будет меняться и представлять среднее между цветом отдельных поверхностей и цветом смеси. Очевидно, что с физической точки зрения не может существовать свет единого качества, который будет соответствовать виду данного объекта, даже если мы будем рассматривать его только по отношению к одному осветителю. Это следует запомнить. Когда мы будем рассматривать вопросы физиологии зрения, мы обнаружим, что неопытный наблюдатель не замечает этих фактов и что некоторые из них не может заметить *ни один* наблюдатель без вспомогательных средств. Когда мы будем рассматривать вопросы живописи, мы увидим, что необходимо воспроизводить не внешний вид и не качество света, а нечто, лежащее между ними, что может быть получено, только если мы воспроизводим то и другое. В связи с этим остальная часть главы будет посвящена рассмотрению физических аспектов некоторых обычных цветов, с которыми мы встречаемся в жизни, и физических свойств некоторых веществ, используемых художниками.

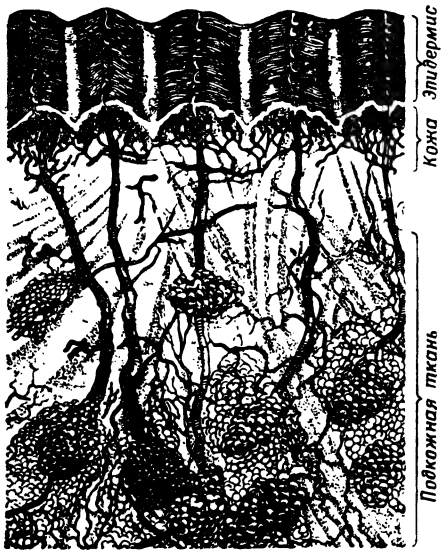
Человеческая кожа

Вероятно, самым важным из всех цветов, с которыми мы встречаемся в природе, является цвет человеческой кожи. Одновременно он является и одним из наиболее сложных. Нашим подробным познаниям в области физики цвета живых тканей мы в значительной степени обязаны работе Эдвардса и Дантли [16], проведенной в Массачусетском технологическом институте. Изложенное ниже в значительной степени почерпнуто из их работ по этому вопросу.

Человеческая кожа состоит из ряда слоев, в которые может проникать свет. Физическое строение кожи показано на фиг. 6.6. Под внешним диффузно отражающим слоем, называемым эпидермисом, расположен слой, в котором свет сильно рассеивается. Ниже находится собственно тело, состоящее из кровеносных сосудов и т. п. По мере проникновения света в кожу имеют место три селективных взаимодействия. Соотношение между интенсивностью этих трех взаимодействий определяет цвет кожи, видимый при данных условиях освещения. На фиг. 6.6 показана лишь средняя структура. На некоторых частях тела, например на губах, эпидермис почти полностью отсутствует. На других же, например на подошвах ног, кровеносные сосуды практически невидимы. Различные

Цветные пятнышки, слишком малые для различения глазом, сливаются и дают аддитивную смесь. Рисунок образован красными и зелеными точками, которые сливаются при наблюдении с расстояния около 1,8 *м*.

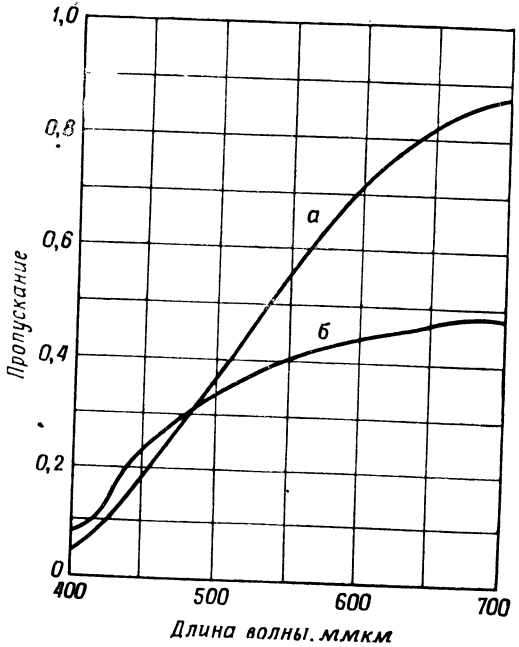
комбинации этих факторов ведут к изменению видимого цвета кожи, который может меняться в диапазоне от желтого, красного, белого до голубого, не говоря уже о ярко-красном, который может образоваться при аддитивном смешении света, рассеянного непосредственно под поверхностью кожи, и красного, идущего из глубины или искусственно полученного с помощью косметических средств. Необходимо отметить следующие селективные взаимодействия. Почти все тело человека (за исключением альбиносов) содержит желтый пигмент, называемый меламином, количество которого под воздействием на кожу солнечных лучей увеличивается. Имеется также связанный с меламином и, как полагают, производный от него, второй желтый пигмент, называемый меланоидом. Кривые пропускания меланина и слоя кожи пятки трупа показаны соответственно на фиг. 6.7, *а* и *б*. Спектрофотометрические характеристики в данном случае определяются свойствами меланоида. Эти пигменты находятся в организме под наружным кожным покровом. Их количество колеблется в зависимости от индивидуума и расы. На фиг. 6.8 показаны кривые отражения кожи для представителей различных рас, полученные Эдвардсом и Дантли [16]. Быстрое изменение цвета, происходящее под действием солнечного света, в первую очередь зависит от увеличения концентрации меланина в крови вблизи поверхности кожи, а не вследствие увеличения его содержания в организме. На фиг. 6.9 показано, как влияет на белую кожу продолжительное действие солнечных лучей.



Ф и г. 6.6 Строение человеческой кожи.
Видны три основных слоя: эпидермис, кожа, подкожная ткань.

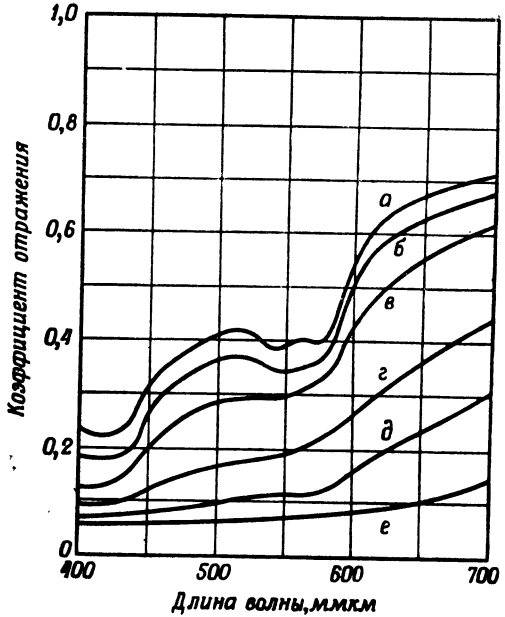
Кривые поглощения света кровью приведены на фиг. 6.10; две формы — гемоглобин и оксигемоглобин — определяют цвет крови до и после того, как она получит кислород в легких.

Голубой цвет, образующийся при рассеянии света, уже обсуждался при рассмотрении цвета неба и эффекта дымки.



Ф и г. 6.7. Кривые пропускания.

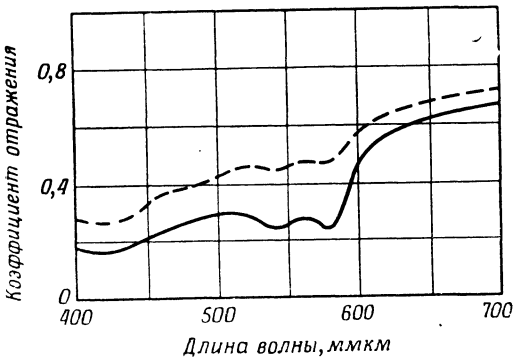
а — для меланина в 5%-ном растворе гидроокиси калия; *б* — поверхностный слой с пятки трупа, который характеризует спектрофотометрические свойства меланоида. [E d w a r d s E. A., D u n t l e y S. Q., *The American J. of Anatomy*, **65**, 9, 13 (1939).]



Ф и г. 6.8 Кривые отражения кожи ягодиц для различных рас.

а — белый блондин; *б*—белый брюнет; *в* — японец; *г* — индус; *д* — мулат; *е* — негр. [E d w a r d s E. A., D u n t l e y S. Q., *The American J. of. Anatomy*, **65**, 29 (1939).]

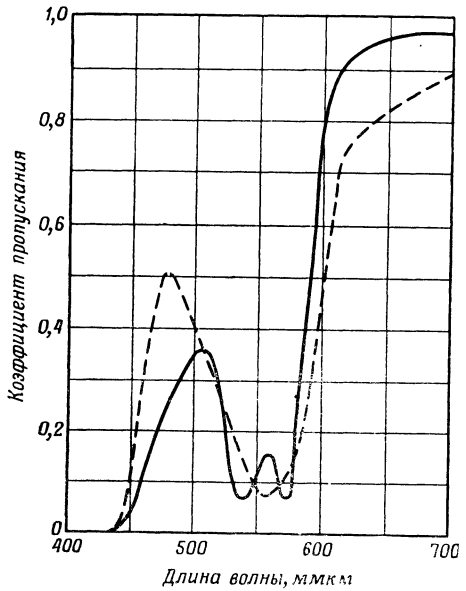
Цвет кожи обусловлен наличием всех трех комбинаций этих эффектов. Цвет губ и тела под ногтями пальцев обусловлен главным образом цветом крови: он красный с небольшой примесью голубого или желтого. Некоторые вены проходят близко от поверхности кожи, и концентрация крови в них настолько велика, что кожа кажется черной. Такие вены кажутся голубыми, поскольку



Фиг. 6.9. Кривые отражения кожи крестца перед облучением (пунктирная кривая) и через 11 *час* после часовой экспозиции под полуденным солнечным светом в августе (сплошная кривая). [Edwards E. A., Duntley S. Q., *Science*, 90, 236 (1939).]

единственный цвет, который виден, является голубым рассеянным светом. В большинстве случаев цвет остальной поверхности кожи меняется от красного до желто-оранжевого, желтого или коричневого в зависимости от расы и степени пигментации. Ввиду наличия внешней диффузно отражающей поверхности с находящимся под ней голубым рассеивающим слоем и желтым пигментом видимый цвет кожи сильно зависит от размера, формы и положения источника света. Как правило, сильный параллельный пучок света глубоко проникает в кожу. Кожа при этом кажется прозрачной. Однако, если свет идет от большого диффузного источника, такой эффект почти совершенно пропадает. Укажем в дополнение, что при жирной коже внешняя диффузная поверхность заменяется гладкой отражающей поверхностью, не добавляющей белого света, вследствие чего цвет становится значительно более насыщенным. По мере того как человек стареет, кожа становится все менее прозрачной и свет под внешним слоем кожи все больше рассеивается. Если это учитывать, становится ясным, что термин «цвет тела» относится к широкой области цветов и включает в себя представление о том, как эти цвета переходят один в другой.

Естественно, что пудра сильно увеличивает диффузное отражение поверхности кожи и уменьшает ее блеск. Если порошок пудры неселективен, его действие сводится к добавлению большого количества белого или почти белого света к свету, отраженному кожей. При толстом слое пудры она может закрыть естественный цвет кожи. Цвет небелой пудры частично заменяет цвет кожи.



Ф и г. 6.10. Кривые пропускания оксигемоглобина (сплошная кривая) и восстановленного гемоглобина (пунктирная кривая), разведенных в отношении 1 : 100. [E d w a r d s E. A., D u n t l e y S. Q., *The American J. of Anatomy*, **65**, 15 (1939).]

Румяна и губная помада имеют такое огромное количество оттенков и цветов, что бесполезно даже пытаться обсуждать их. Как правило, румяна образуют диффузно отражающую поверхность, а помада применяется для того, чтобы создать глянцевую поверхность и обеспечить глубокий цвет. Последнее справедливо также для лака для ногтей. Некоторые из этих лаков имеют чистые цвета и часто обладают значительной люминесценцией.

Волосы, глаза и зубы

Люди различаются не только по цвету кожи, но и по цвету волос, глаз и зубов. Цвета волос образуют непрерывный ряд от белого через желтый, оранжевый, красный и коричневый к черному. Волосы отличаются не только по цвету, но и по структуре и по блеску. Есть волосы очень блестящие, а некоторые отражают свет в значительной степени диффузно. Окраска волос обеспечивается наличием одного или в крайнем случае двух пигментов. Белые волосы имеют такой цвет вследствие того, что в них практически отсутствуют пигменты, а содержатся лишь бесцветные диффузно рассеивающие свет вещества. Цвет черных волос объясняется наличием большого количества пигмента при наличии гладкой блестящей поверхности. Волосы, которые кажутся черными, часто в проходящем свете оказываются красными.

Цвет глаз объясняется наличием или отсутствием только одного

селективно поглощающего пигмента, а также различного количества рассеянного голубого света. Этот пигмент имеет коричневый цвет. Возможно, что это меланин. Рассеянный свет появляется вследствие неоднородности структуры. Ряд цветов от светло-голубого до серого образуется за счет различия в количестве рассеянного света при отсутствии пигмента. Все другие цвета получаются при различном количестве коричневого пигмента и разном соотношении рассеянного голубого света. Ввиду того что рассеянный свет играет важную роль, цвет некоторых глаз заметно меняется при изменении условий освещения, в особенности цвет серо-зеленых глаз.

У редко встречающихся альбиносов, у которых пигменты отсутствуют, глаза иногда кажутся розовыми благодаря красному свету, отраженному кровеносными сосудами внутри глаза. Подобный темно-красный цвет может быть иногда виден в глазах всех людей, если свет проникает через зрачок таким образом, что становится непосредственно виден внутренний красный слой глазного яблока. У одних людей это заметить легче, у других — труднее. Такое различие может быть вызвано разницей в отражении света внутренней поверхностью глаза.

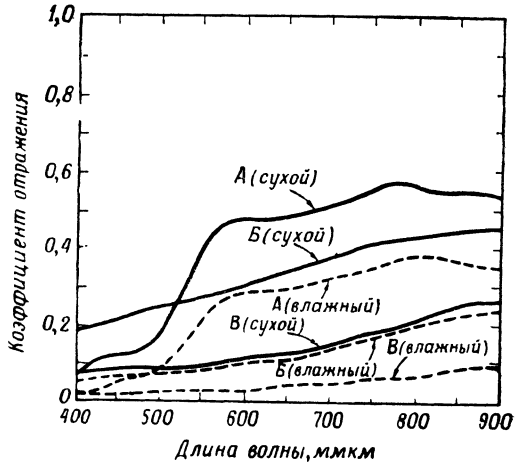
Цвет зубов может меняться в более широком диапазоне, чем обычно полагают. Он меняется от темно-желтого через белый до голубовато-белого.

Цвета в природе

Необходимо сказать о таких природных цветах, как цвет воды, почвы, листьев и цветов.

Действительный цвет чистой воды кажется бледно-зеленым, хотя он виден только в том случае, если свет пройдет через значительную толщу воды. В отдельных конкретных случаях цвет воды зависит от наличия растворенных в ней веществ или присутствия мельчайших живых существ. Влияние этих факторов может меняться с изменением температуры воды, а также в зависимости от наличия мелкого взвешенного песка, поднимаемого при движении воды. Таким образом, цвет воды может изменяться от темно-синего через много оттенков зеленого до практически бесцветного. В больших водоемах эти основные цвета воды могут быть искажены вследствие поверхностного отражения. В безветренный день, когда поверхность воды практически совсем гладкая, хорошо видны отраженные от нее небо и облака, наблюдатель видит их раздельно от воды и не смешивает с цветом воды. Однако, когда ветер волнует поверхность воды или если водоем очень большой, где вода вблизи берега практически никогда не спокойна, отражение неба смешивается с цветом воды и эта смесь видна как единый цвет. Если небо

равномерно голубое, то добавляется только этот цвет. Если небо не сплошь покрыто облаками, отраженные цвета будут зависеть от направления наблюдения. Эти направления не соответствуют направлениям зеркального отражения, поэтому отраженная часть неба может быть видна в неожиданном для наблюдателя направлении, иногда даже сзади него. Поэтому вполне возможно, что, если прямо

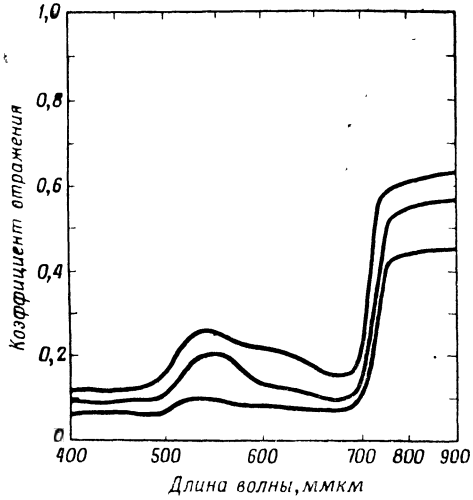


Ф и г. 6.11. Кривые отражения типичных образцов почвы в видимой и инфракрасной частях спектра.

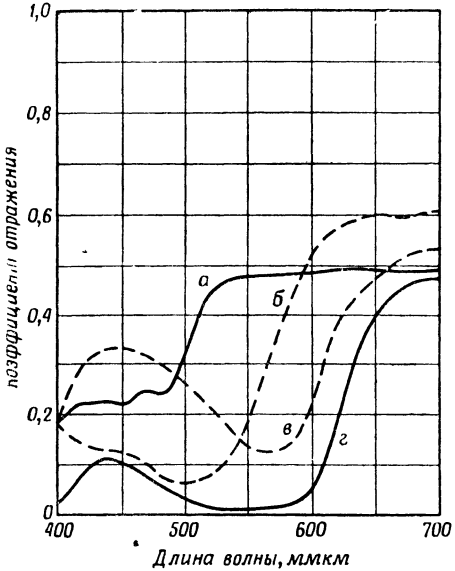
перед наблюдателем находится чистое голубое небо, а остальная его часть покрыта облаками, вода не будет отражать голубого излучения.

Цвета почвы меняются от красного до желтого и могут иметь различную насыщенность и светлоту. Эти цвета включают почти все разнообразие коричневых — от почти черных до совсем светлых. Влажные почвы всегда темнее, чем сухие, и цвет их несколько более насыщенный. Влажные красновато-коричневые почвы обычно становятся желтоватыми. Кривые спектрального отражения для некоторых почв приведены на фиг. 6.11.

Цвета листьев различных типов растений заметно отличаются и изменяются в зависимости от времени года. Почти как и цвет всех других природных объектов, цвет листьев несколько меняется в зависимости от направления освещения и наблюдения. Поскольку здесь нельзя привести подробные данные для всех возможных случаев, на фиг. 6.12 даны спектрофотометрические кривые для нескольких типичных зеленых листьев. Особый интерес имеет большое отражение света листьями в инфракрасной области спектра.

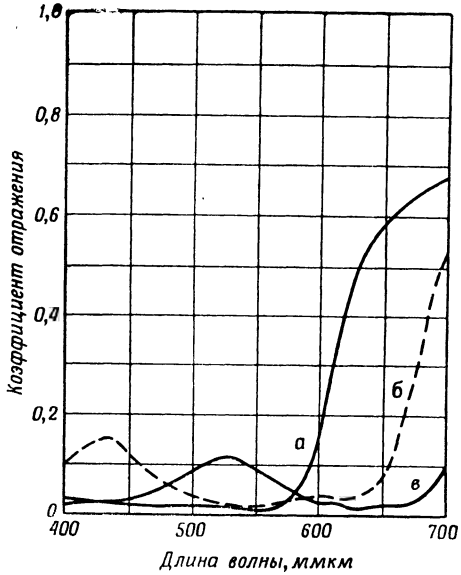


Ф и г. 6.12. Кривые отражения зеленых листьев в видимой и инфракрасной частях спектра.



Ф и г. 6.13. Кривые отражения излучения некоторыми известными цветами.

а — гладиолус желтоватый; *б* — гладиолус ярко-оранжевый; *в* — роза бледно-фиолетовая; *г* — гладиолус винно-красного цвета.



Ф и г. 6.14. Кривые отражения окрашенного фетра.

а — красный; *б* — пурпурный; *в* — зеленый

Наибольшим разнообразием в селективных свойствах среди природных поверхностей, естественно, обладают лепестки цветов. По своей селективности они уступают лишь некоторым современным красителям. Кривые отражения для общеизвестных цветов приведены на фиг. 6.13. Для сравнения на фиг. 6.14 приведены кривые спектрального отражения некоторых наиболее насыщенных красителей.

Цвета масляных красок и цвета в природе

Часто художники выражают сожаление, что гамма цветов, которые они могут получить с помощью красок и пигментов, значительно уже гаммы цветов, встречающейся в природе, и что поэтому часто приходится идти на условности и компромиссы при создании желаемых эффектов. Очевидно, что компромиссы и условности необходимы, однако, перед тем как мы проникнем в лабиринт визуальных и психологических эффектов, будет полезно исследовать эти вопросы с чисто физической точки зрения.

Вначале можно сказать, что очень немногие цвета природных объектов не могут быть воспроизведены художником с помощью масляных красок. Так что, если оба цвета поместить рядом, они, за исключением различий в фактуре, будут казаться совершенно одинаковыми. Таким образом, проблема *не* в том, что невозможно воссоздать вид поверхности точка за точкой, трудность заключается в том, что, в то время как картина освещается равномерно, природные объекты имеют *обычно разную* освещенность. Когда художник пытается воспроизвести некоторый пейзаж, ему приходится воспроизводить объекты различного цвета, освещенные в различной степени. В серый облачный день художнику сравнительно легко точно передать все видимые цвета и яркости, но когда светит солнце и небо ясное, перед ним возникают большие трудности даже при попытке осознать их вид. Рассмотрим эту проблему для черно-белых объектов. В природе отношение яркостей белого объекта, освещаемого ярким солнечным светом, и черного объекта, находящегося в глубокой тени, может легко достигать величины 2000 : 1. Если в передаваемой сцене есть непосредственно видимые глазом источники света, это отношение может быть значительно бóльшим. Поверхность, обычно называемая черной, как правило, отражает около 4% и практически никогда не меньше 0,25% (даже черный бархат и сажа редко имеют такую малую величину отражения). Наилучшие белые поверхности редко отражают более 98% (хороший белый мел). Белая бумага обычно отражает лишь около 70%. Наибольшее отношение яркостей, которое может быть получено в картине, как это следует из приведенных данных, с трудом достигает 400 : 1. В большинстве случаев это отношение редко превышает

50 : 1 или 100 : 1. Диапазон возможных интенсивностей для других цветов еще меньше. Это и есть та проблема, для решения которой художник должен использовать все свои возможности. К счастью, глаз художника (и наблюдателя!) не может эффективно работать в таком широком диапазоне яркостей. Позже будет показано, что глаз автоматически уменьшает контраст яркости при рассмотрении сцены, и по этой, а также ряду других причин изображение, которое будет выглядеть *наиболее подобным* сцене, не должно обеспечивать действительного соотношения яркостей сцены. Те же соображения применимы, естественно, и к цветной фотографии. Даже при использовании лучших красок и пигментов с трудом получают соотношение яркостей 200 : 1. Некоторые типы объектов, несмотря на то что они освещены неравномерно, могут быть полностью воспроизведены или средствами живописи, или с помощью фотографии. Это те объекты, *контраст* которых *мал*. Предположим, например, что отношение наибольшего коэффициента отражения к наименьшему не превышает 8 : 1. Такой объект можно легко изобразить, и он будет казаться имеющим естественный контраст при равномерном освещении. Предположим, что на этот объект падает одна тень. Поскольку общий контраст зависит от произведения коэффициентов отражения на величину освещенности, то отношение яркости освещенной части к яркости теневых участков может достигать довольно высоких значений — порядка 25 : 1. Таким образом, любой участок объекта по яркости не выходит за пределы, которые могут быть воспроизведены. Эта возможность, по-видимому, является одной из причин, привлекающих художников к натюрмортам. Вполне возможно так построить изображаемый объект, что можно воспроизвести *все* его участки (хотя в большинстве случаев такое воспроизведение играет для художника только вспомогательную роль).

Сокращение диапазона яркости является, конечно, только *одной* из задач художника. С этим связаны многие другие обстоятельства, например движение, бинокулярное зрение, изменение в относительном положении вследствие движения головы и др., которые в значительной степени определяют данную сцену, но которые должны быть изображены на двухмерной поверхности. Хотя автор не является художником, ему кажется справедливым, что точное знание физики цвета и возможностей зрения, изучению которого будут посвящены последующие главы, поможет художнику яснее увидеть эти проблемы.

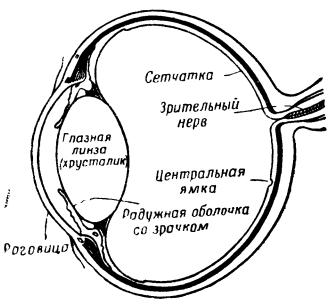
ГЛАВА VII

Цветовое зрение

Глаз обычно сравнивают с маленькой фотокамерой, и действительно между ними существует некоторое сходство. Это сходство состоит, однако, почти исключительно в существовании линзы, образующей изображение на задней поверхности глаза.

Строение глаза

Разрез глазной линзы, называемой хрусталиком, и световоспринимающей задней поверхности глаза, называемой ретиной или сетчаткой, показан на фиг. 7.1. Попадающий в глаз свет от помещенного перед ним рассматриваемого предмета фокусируется хрусталиком на сетчатке. В результате образуется перевернутое изображение, подобно тому как это происходит в фотокамере.



Ф и г. 7.1. Вид глаза в сечении.

Фокусное расстояние хрусталика изменяется и регулируется более или менее непроизвольно глазными мышцами, изменяющими кривизну его поверхности так, чтобы были ясно видны предметы, находящиеся на данном расстоянии от наблюдателя. Как и для большинства простых одиночных линз, фокусное расстояние хрусталика зависит от длины волны, так что коротковолновый свет фокусируется в более близкой точке, чем длинноволновый. Степень открытия поверхности хрусталика регулируется другой группой мышц, которые изменяют в некоторых пределах диаметр зрачка в соответствии с интенсивностью входящего в глаз света. Эти изменения аналогичны регулированию диафрагмы в фотокамере с той лишь разницей, что действие здесь непроизвольно и по сравнению с камерой диапазон изменения отверстия не столь широк. Когда зрачок (отверстие в радужной оболочке) максимально сужен, тонкость деталей, которые могут быть различимы глазом, значительно

возрастает, в чем, пожалуй, и заключается основная физиологическая функция зрачка. Когда свет очень ярок, зрачок сужается и на сетчатке получается резкое изображение. Интервал, в котором при этом изменяется интенсивность изображения, ничтожно мал по сравнению со способностью глаза «отдыхать», т. е. изменять свою чувствительность применительно к различным уровням яркости.

Световоспринимающая часть глаза — сетчатка, соответствующая пленке в фотокамере,— представляет собой поверхность, состоящую из отдельных светочувствительных нервных элементов двух основных типов. Они могут быть представлены как маленькие фотоэлементы, находящиеся в каждом глазу в чрезвычайно большом количестве [1]. Когда изображение падает на такую мозаику из нервных окончаний, каждая отдельная клетка реагирует определенным образом, вызывая электрическое возмущение, передаваемое далее в мозг. Детали реакций отдельных клеток могут восприниматься мгновенно. Важно проследить вначале этапы передачи этих реакций в центры мозга, чтобы получить некоторое представление о физиологии зрительного механизма.

Светочувствительные элементы в сетчатке соединены с нервными волокнами, идущими из глазного яблока назад к основанию мозга. В некоторых участках сетчатки от каждой клетки идет отдельное нервное волокно, тогда как в других участках одно волокно соединено одновременно с несколькими клетками. Все нервные волокна сразу по выходе из глаза собраны сзади глазного яблока в один пучок (зрительный нерв), как это показано на фиг. 7.2. В каждом пучке содержится около 1 млн. волокон.

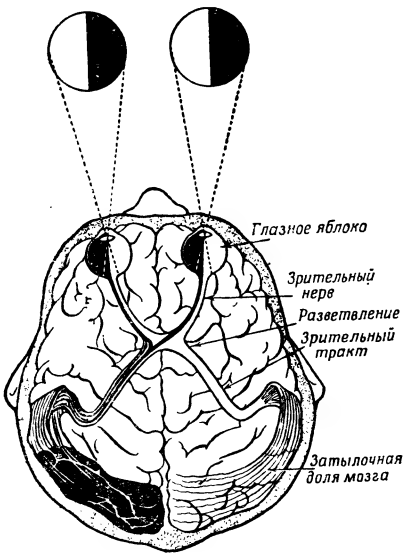
Зрительные нервы идут к задней части головы, где они разветвляются на два тракта и перекрещиваются, как показано на рисунке, так что дальше в каждом зрительном тракте содержатся волокна от обоих глаз. Оба пучка продолжаются до основания мозга, и каждый соединяется с одной половиной затылочных долей (см. фиг. 7.2).

Сведения относительно того, какие нервные волокна перекрещиваются и как они разделяются между пучками, составляют увлекательную главу хирургии и физиологии. Было найдено, что в каждом глазу имеется центральная (приблизительно круглая) зона, которая соединена с обоими полушариями мозга. По сторонам от этой зоны левая половина каждого глаза (если разделить его по вертикали) соединена с одной стороной мозга, а правая совершенно независимо — с другой. Следовательно, повреждение целиком одной затылочной доли нарушает зрение в половине каждого глаза

[1] Сетчатка глаза содержит около 7 млн. палочек и 130 млн. колбочек. См. [7] в дополнительном списке литературы. — *Прим. ред.*

и ослабляет в обоих глазах центральное зрение, но полностью зрения не выключает ни в том, ни в другом глазу.

Рассматривая точку за точкой сетчатку глаза по отношению к затылочным долям мозга, мы найдем, что от точек, приблизительно соответствующих друг другу в сетчатках обоих глаз, идут нервные волокна, оканчивающиеся также в приблизительно симметричных точках затылочных долей мозга. Таким образом, при рассматривании объектов реакция соответствующих чувствительных клеток в сетчатках обоих глаз передается приблизительно одинаковым точкам мозга. В то время как объекты при центральном зрении представлены в обеих половинах мозга, периферические объекты представлены только в какой-либо одной половине. Описанная очень сложная структура показывает, что изображение, образующееся на сетчатках обоих глаз, повторяется в преобразованном виде на участках двух половин основания мозга.

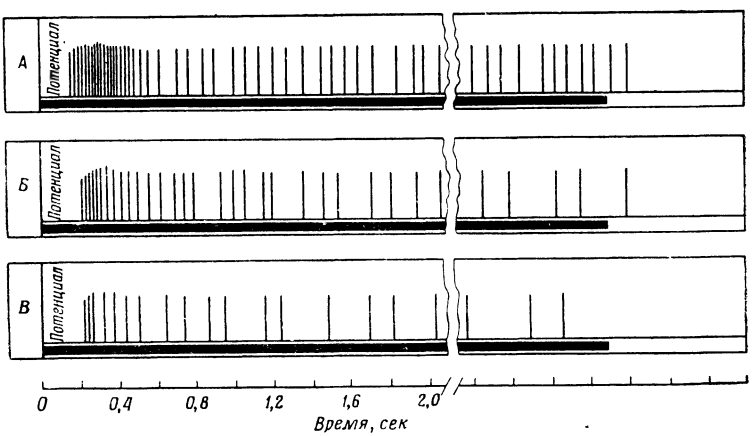


Ф и г. 7.2. Схематическое изображение глаза, оптических нервов и затылочных долей мозга.

Затылочные доли сложной системой нервов соединены с высшими центрами мозга, и путь этих нервов показывает, что картина затылочных долей там повторяется снова, но в еще более деформированном, преобразованном виде. Что происходит, когда мы «видим», как «ви́дение» связано с сознанием, и что означает само выражение «сознание» — составляет предмет философии, выходящий за рамки разбираемого здесь вопроса. Мы можем обсуждать этот вопрос со всех точек зрения, но его сущность остается столь же загадочной, как и само явление жизни.

Однако путь от глаза до затылочных долей мозга исследован вполне достаточно, чтобы можно было составить некоторое представление о происходящих явлениях. От сетчатки глаза в каждом из миллионов нервных волокон протекает микроток, когда клетка или группа клеток, от которых это волокно отходит, возбуждается светом, дающим изображение на сетчатке. Природа этого тока исследована. Когда на клетку действует свет, то протекающий по соответствующему нерву электрический ток остается приблизительно

постоянным по амплитуде, но изменяется по частоте в зависимости от интенсивности раздражителя. Однако частота несколько понижается, если свет продолжает действовать в течение некоторого времени, и в конце концов падает до низкого уровня (фиг. 7.3). Неизвестно, как этот ток связан с восприятием света или цвета и каким образом источник света может выглядеть постоянным по интенсивности, в то время как сигнал, идущий к мозгу, изменяется



Ф и г. 7.3. Графики действующих потенциалов в одиночном нервном волокне глаза подковообразного краба (limulus polyphemus) для интенсивностей раздражителей *A*, *B*, *C* с соотношениями 1 : 0,1 : 0,01.

Время отмеряется от начала освещения; продолжительность показана непрерывной жирной линией. Разрыв в графиках соответствует промежутку времени 1,4 *сек* (для *A*), 4,5 *сек* (для *B*) и 3,3 *сек* (для *C*). Потенциал каждого возникающего импульса составляет приблизительно 0,3 *мв*. [Hartline H. K., Graham C. H., *J. of Cellular and Comparative Physiology*, 1, 285 (1932).]

за время освещения. Однако некоторые свойства зрительного механизма (такие, как адаптация к яркости), которые будут рассмотрены, должны быть связаны непосредственно с природой этих сигналов. В настоящее время можно лишь сказать, что изложенные выше факты могут служить предметом для размышлений и образуют заманчивую область для исследований.

От глаза отходят тесно переплетенные нервные волокна в виде пучка диаметром всего несколько миллиметров. Каждое нервное волокно, соединенное со зрительной клеткой, на которую падает свет, несет в себе быстрые изменения электрического потенциала. Электротехники усмотрят в описанной схеме условия для осуществления «перекрестных» разговоров в телефонной сети и не будут удив-

лены, столкнувшись с подобными терминами при рассмотрении явлений «одновременного контраста» и «ослепленности», когда освещение одной части глаза оказывает несомненное воздействие на другие.

Таково вкратце действие нервного механизма глаза. Прежде чем рассмотреть общие характеристики зрения в целом, следует остановиться на мозаике нервных окончаний в глазе, называемой сетчаткой.

Хрусталик и сетчатка

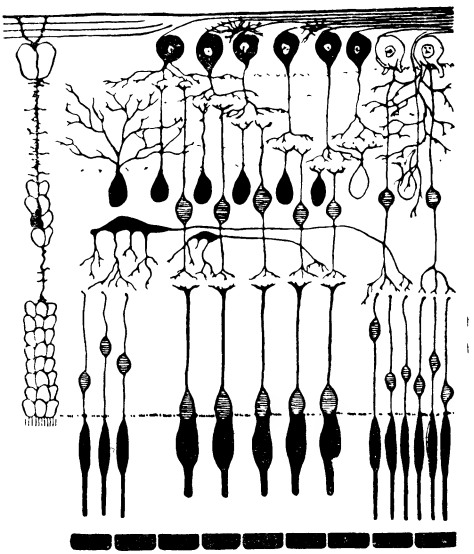
Расстояние от хрусталика до сетчатки составляет приблизительно 14,6 *мм* и заполнено студенистой массой (стекловидным телом), коэффициент преломления которой равен 1,336 и в которой мы иногда как бы «видим» плавающие предметы вследствие отбрасываемых ими теней. Диаметр зрачка изменяется от 2 до 8 *мм* в зависимости от интенсивности освещения глаза, и глаз может нормально видеть предметы на расстоянии от 20 *см* до бесконечности благодаря изменению фокусного расстояния хрусталика. На основании вышеизложенного можно сказать, что оптическая система глаза может изменять свое фокусное расстояние от 18,7 до 20,7 *мм* и относительное отверстие (отношение диаметра зрачка к фокусному расстоянию) — от 1 : 2,3 до 1 : 10,4. Глаз более или менее корригирован в отношении хроматических аберраций, но имеет сравнительно сильную цилиндрическую дисторсию, обычно вертикальную и горизонтальную, но часто и под углом (такая аберрация известна как астигматизм зрения).

Перевернутое изображение, формируемое этой системой, падает на чрезвычайно сложную структуру нервных окончаний. По отношению к внешнему наблюдателю эта структура (сетчатка) является внутренней оболочкой глаза; свет проходит сквозь сетку нервных волокон, идет вдоль них и достигает светочувствительных окончаний (см. фиг. 7.2). Общее расположение элементов, в котором свет входит сверху, схематически показано на фиг. 7.4.

Сами по себе нервные окончания можно четко разделить на два типа: колбочки и палочки. Из сравнительной физиологии известно, что животные, в глазах которых имеются только палочки, различают свет только по интенсивности, тогда как животные, в глазах которых имеются и палочки и колбочки, различают не только интенсивность света, но и цвет. Из этого, а также из данных о распределении цветовой и световой чувствительности на сетчатке глаза человека вытекает, что колбочки являются первичными цветочувствительными, а палочки — первичными светочувствительными нервными элементами органа зрения.

Указанные типы нервных окончаний распределяются по сетчатке неравномерно. Приблизительно в центре сетчатки каждого глаза

находится участок (ямка) диаметром около 0,5 *мм* (угловой размер 1°40′), на котором совершенно нет палочек, но чрезвычайно много колбочек. В каждом глазу в такой центральной ямке содержится около 34 000 колбочек; каждая колбочка имеет свое нервное волокно, соединяющее ее с мозгом. Этот участок является местом наиболее отчетливого зрения. Когда рассматривается какой-либо предмет, то отчетливо видна лишь та его часть, изображение которой попадает на центральную ямку. Остальная часть поверхности сетчатки состоит из смеси палочек и колбочек с постепенным непрерывным уменьшением числа колбочек по мере удаления от центра. У височных краев на сетчатке имеются уже только палочки. Так как общее число нервных волокон значительно меньше числа колбочек и палочек, а в центральной части сетчатки имеется по одному нервному волокну на каждую отдельную колбочку, очевидно, что на других участках сетчатки на одно нервное волокно должны воздействовать несколько колбочек. Очевидно также, что чувствительность к цвету и к форме предметов должна снижаться с удалением от центра в связи с уменьшением числа колбочек, а чувствительность к *изменениям* яркости должна возрастать, так как здесь помногу элементов присоединено к каждому одиночному нерву. Однако нас интересуют в данном случае прежде всего явления центрального зрения, и поэтому мы не будем останавливаться на всех этих уточнениях. Все же следует отметить, что боковые участки поля зрения служат прежде всего для восприятия движения предметов, в то время как центральный участок используется в основном для восприятия цвета и формы.



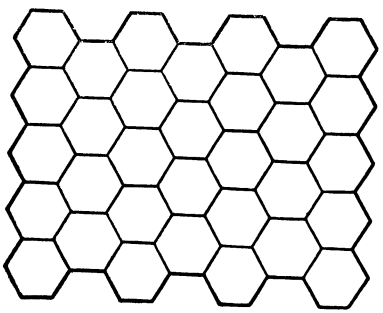
Фиг. 7.4. Поперечное сечение сетчатки (сильно увеличено).

Видны палочки, колбочки и нервные волокна.

В дополнение к разделению нервных окончаний на колбочки и палочки участки поверхности сетчатки отличаются также различным содержанием окрашивающих пигментов. Нервные окончания

погружены в темно-окрашенные растворы, которые препятствуют отражению света от задней стенки глазного яблока и играют в общем такую же роль, как противоореольный подслой на фотопленке.

Центральная зона, в которой содержатся только колбочки, окружена и покрыта слоем желтого пигмента, ослабляющего синий свет, идущий к концам колбочек. Этот слой известен как желтое пятно. Его функция заключается, возможно, в повышении различения тонких деталей на этом участке, но его вариации от одного человека к другому так велики, что это приводит к значительной разнице в цветовом зрении отдельных людей.



Ф и г. 7.5. Схема сотовой структуры поверхности сетчатки.

Так как задняя часть глаза состоит из отдельных светочувствительных нервов ограниченного размера, очевидно, что только предмет, больший некоторой определенной минимальной величины, может быть виден в его действительных размерах относительно других предметов. Колбочки тесно примыкают друг к другу, образуя нечто вроде мозаики из шестиугольников, подобной сотам (фиг. 7.5). Средний поперечник элемента этой мозаики составляет около 3 *мкм*, что соответствует высоте изображения человека ростом 1,83 *м*, рассматриваемого с расстояния 10 *км*. Однако на основании сказанного еще нельзя составить полного представления о замечательной способности глаза предоставлять мозгу достаточную информацию для восприятия объектов. Телеграфный провод может быть виден с расстояния более 0,5 *км*. С такого расстояния, если линза совершенна, изображение провода будет иметь ширину всего 0,2 *мкм*. Однако то обстоятельство, что изображение провода протяженно и пересекает ряд элементов сетчатки по непрерывной прямой, позволяет передать мозгу сообщение, что здесь действует прямой ряд, и мозг производит соответствующее правильное истолкование! Точно такое же действие оказывают на сетчатку все прямолинейные края предметов; во всех этих случаях разрешающая способность глаза оказывается во много раз больше, чем это следовало бы из расчета, основанного на размере элементов сетчатки. Некоторые авторы полагают, что за время, пока изображение достигнет мозга, происходит формирование всех изображений внутри таких очертаний (контуров), с чем, по-видимому, можно согласиться. Однако с уверенностью мы можем сказать лишь то, что изобра-

жение, постоянно перемещающееся по сетчатке при движении глаз, создает в мозгу за это короткое время чисто мысленное построение предмета. По подробности деталей эта мысленная картина может далеко превосходить все то, что удается получить с помощью стеклянной линзы и фотопластинки в наилучших условиях.

Однако если в поле зрения попадает относительно яркий участок, например фонарь ночью и т. п., глаз не способен видеть предметы, находящиеся по соседству с этим световым пятном. Это объясняется двумя явлениями. Во-первых, хрусталик сам по себе имеет тенденцию рассеивать свет и этот вуалирующий свет может оказаться более интенсивным, чем свет от теневых участков объекта, так что детали в тенях изображения окажутся закрытыми образовавшейся «вуалью». Во-вторых, глаз изменяет свою чувствительность в зависимости от суммарного общего света, попадающего в него, и в этих условиях чувствительность глаза может снизиться настолько, что свет от теневых участков на него совершенно не будет действовать. Хотя для данного частного случая восприятия оба явления можно рассматривать как дефекты, однако в действительности при более нормальных условиях они представляют ценные свойства зрения.

Приведенное выше краткое описание глаза, нервов и мозга может дать элементарное представление о том, каким образом свет может превратиться в наше психическое восприятие. Даже наилучшая картина всегда в чем-нибудь несколько туманна, и неудивительно, что некоторые свойства зрительного механизма (включающего в себя глаз и мозг) не имеют готовых объяснений в выражениях из повседневной жизни. Однако свойства зрения детально исследовались в течение многих лет. Некоторые из этих свойств будут приведены в следующих разделах.

Влияние интенсивности освещения

Способность глаза различать тонкие детали предмета определяет собой ту ясность, с какой мы видим отдельные объекты. Как и другие свойства зрения, эта способность изменяется в широких пределах в зависимости от условий. Для обычных, простых предметов наиболее важным фактором является общая интенсивность освещения. При очень низкой освещенности могут различаться только грубые формы, с увеличением освещенности зрение быстро и непрерывно улучшается. Однако даже при таком слабом освещении, как ночью в полнолуние, мы сравнительно хорошо различаем детали и способны различать отдельные линии приблизительно лишь в 4 раза хуже, чем при полном дневном свете.

Кроме интенсивности освещения, на способность зрения различать тонкие детали оказывают влияние и многие другие факторы.

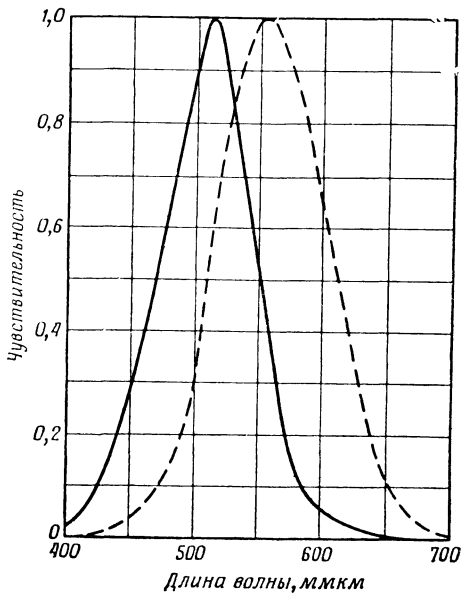
При этом особенно важным условием является то, чтобы данный глаз был в состоянии формировать резкое изображение на сетчатке. Однако, учитывая, что для повышения резкости изображения можно применять корригирующие стекла (очки), основными переменными факторами следует считать контраст между деталью и фоном, резкость и правильность контуров детали, размеры отдельных частей детали, ее перемещение относительно наблюдателя и фона, равномерность освещения. Каждый из этих переменных факторов был тщательно исследован как при граничных, крайних условиях, так и в более общем случае нормального зрения. Предмет этот оказывается настолько сложным, что здесь, пожалуй, лучше отметить лишь общее направление явлений. Высокий контраст, четкие контуры, движение и мелькание рассматриваемого предмета — все это в определенных пределах делает возможным видеть все более и более тонкие детали предметов.

Однако чрезмерное проявление любого из этих факторов, за исключением четкости контура, делает различение более затруднительным. Прямые линии видеть легче, чем изогнутые, а тонкие прямые линии обычно легче различать при их вертикальном или горизонтальном расположении по отношению к глазу, чем при расположении по диагонали.

При очень низкой освещенности важное значение имеет также время, в течение которого свет действует на глаз. В этих условиях наименьшая воспринимаемая яркость и соответственно наименьший размер различимой детали приблизительно обратно пропорциональны времени действия света. Важную роль при низкой освещенности играет также площадь: в первом приближении наименьшая яркость, которая едва заметна в темноте, обратно пропорциональна площади объекта. Оба эти правила можно объединить следующим образом: при минимальных замечаемых освещенностях глаз реагирует скорее на общее количество попадающего в него света, чем непосредственно на яркость, которая, однако, определяет восприятие при более высоких уровнях.

Однако при цветных объектах гораздо меньший интерес представляет минимальная замечаемая яркость или площадь, чем наименьшие различия в яркости или в цветности, которые могут еще быть обнаружены при нормальных уровнях освещенности. Действительно, при наиболее низких освещенностях восприятие цвета вообще полностью пропадает. Как уже отмечалось ранее, в сетчатке глаза имеются палочки и колбочки, причем к свету наиболее чувствительны палочки. Это вполне подтверждается тем фактом, что при минимальной интенсивности освещения глаз замечает только различия в яркости, причем в центральной части глаза, где имеются одни лишь колбочки, этот слабый свет вообще не воспринимается.

Если интенсивность освещения повышать от значений, при которых предметы могут быть едва различимы, до обычной дневной, то колбочки сразу начинают функционировать (приблизительно при освещенности 1 *лк*) и происходит переход к цветовому зрению в обычном смысле этого слова. Это изменение сопровождается значительным возрастанием способности глаза различать разницу в яркостях, а также значительным изменением чувствительности к излучениям с разными длинами волн. Отмечается также изменение интервала интенсивностей (яркостей), в котором детали могут быть видны одновременно. Так как эти явления очень существенны для цветового зрения, целесообразно сначала рассмотреть их исключительно с точки зрения ощущаемых яркостей и яркостных различий, пренебрегая пока что возможными различиями в цвете. Рассмотрение будет, таким образом, ограничено лишь яркостными восприятиями независимо от того, каковы они по цвету.



Ф и г. 7.6. Относительная световая чувствительность глаза при скотопическом (сплошная линия) и фотопическом (пунктирная линия) уровнях зрения. [W e a v e r K. S., *J. of the Optical Soc. of America*, **27**, 39 (1937).]

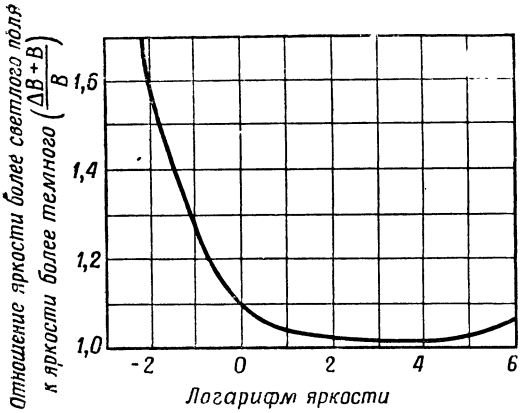
При низкой интенсивности света глаз имеет максимальную чувствительность в области более коротких длин волн, чем при интенсивности, соответствующей нормальному зрению. Зрение при этом низком уровне обозначается термином «скотопическое». Относительная чувствительность глаза к свету различных длин волн при низкой интенсивности показана на фиг. 7.6, где для каждой длины волны по ординате отложена величина, обратная той относительной энергии, которая необходима для получения при всех длинах волн одинаковой фиксированной яркости. Для сравнения там же пунктиром показана кривая чувствительности при нормальном, или «фотопическом», зрении. Так как максимум пунктирной кривой лежит в области спектра, воспринимаемой обычно как желтая, а максимум чувствительности скотопического зрения лежит в зоне зеленого, получается, что если зеленый и желтый предметы при

дневном свете выглядят одинаково яркими, то при освещенностях, настолько низких, что предметы будут едва видны, зеленый будет более ярким (при этом оба они будут серыми!). Это явление известно как явление Пуркинье; его можно наблюдать в поздние сумерки, когда зеленые предметы становятся ненатурально яркими по сравнению с желтыми и красными. Красный при этом часто может выглядеть черным, в то время как зеленый еще будет иметь значительную яркость и будет вследствие этого выглядеть серым.

Кривые контрастной чувствительности

Более важным, чем явление Пуркинье, является ход тех изменений чувствительности глаза к различиям в яркостях и к интервалу яркостей, которые происходят с изменением средней яркости поля зрения. Если небольшое разделенное пополам поле выполнено так, чтобы яркость каждой половины могла изменяться независимо от другой, можно для любого уровня яркости определить первую едва замечаемую разницу (порог) между яркостями половин поля. Если после установки полей на едва заметную разность подгонять всякий раз менее яркую половину поля к уровню более яркой (добиваться равенства яркостей) и далее повторять весь этот процесс, можно «прошагать» весь интервал яркостей едва заметными (пороговыми) разностями. Это было проделано многими исследователями. И несмотря на то, что результаты в значительной мере зависят от условий опыта, имеется очень хорошее общее соответствие между результатами, полученными в различных условиях. Для поля, имеющего форму маленького круга, разделенного пополам по вертикальному диаметру, полученные результаты могут быть изображены кривой фиг. 7.7. Для тех, кто не привык к логарифмам, эта кривая может быть несколько трудной для объяснения, но имеется много причин изображать ее именно таким образом. Отметим, в частности, что при отказе от использования логарифмов для изображения равнозначной кривой потребовался бы кусок бумаги длиной в несколько метров. Интервал интенсивностей, видимый глазом, составляет немногим больше 1 000 000 : 1. Если интервал от 1 до 2 должен иметь на графике заметный размер, то для изображения всей кривой потребуется (по оси абсцисс) линейная шкала длиной в 1 000 000 раз больше. В то же время, если по оси ординат отложены отношения интенсивностей, полная шкала получается чрезвычайно короткой. Кроме того, как известно, для любой пары чисел, составляющих определенное отношение, разность логарифмов будет одинакова. Вследствие этого логарифмическая шкала интенсивностей, такая, как на горизонтальной оси графика фиг. 7.7, имеет то преимущество, что каждое определенное расстояние (отрезок) на ней выражает собой определенное *отношение*

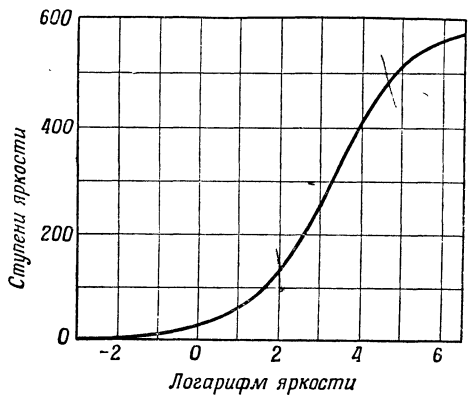
яркостей независимо от положения этого отрезка на шкале. Расстояние на логарифмической шкале от 1 до 2 представляет в интенсивностях отношение 10, так же как, например, расстояние от 5 до 6. Величины, отложенные на этом графике по вертикали, выражают отношения едва заметно бо́льших яркостей ($B + \Delta B$) к яркостям (B), с которыми они сравниваются.



Ф и г. 7.7. Кривая, показывающая, как при различных уровнях освещения изменяется отношение яркостей двух соприкасающихся полей, отличающихся друг от друга по яркости на первую едва заметную разницу. [T r o l a n d L. T., Principles of Psychophysiology, vol. 2, N. Y., 1930, p. 78.]

При низких уровнях яркости для обнаружения различия требуется более высокое отношение яркостей; далее, с увеличением яркости требуемое отношение падает до сравнительно небольшой величины, которая практически остается постоянной в значительном интервале, при высоких же уровнях яркостей это отношение снова возрастает. Когда впервые был исследован этот вопрос, считалось, что в нормальных пределах интенсивностей отношение или относительное приращение, вызывающее едва заметное изменение ощущения, является действительно постоянным. Г. Т. Фехнер (1801—1887), один из ранних исследователей в этой области, решил, что такое соотношение является основным психофизическим принципом, и этот закон известен с тех пор как закон Вебера — Фехнера. Он заключается в том, что при физическом стимуле (раздражителе) любого рода возрастание психофизической реакции (приращение ощущения) будет постоянным, если интенсивность раз-

дражителя увеличивается в определенном отношении независимо от абсолютного уровня интенсивности. Значительно позже было показано, что этот закон строго выполняется лишь в специальном случае при средних величинах интенсивности (яркости), однако он дает все же приблизительное общее правило для всех условий. Применительно к зрению это правило можно выразить следующим образом: зрительный орган имеет тенденцию давать постоянное одинаковое приращение ощущения, когда интенсивность раздражителя изменяется в постоянном отношении. Другими словами, глаз чувствителен скорее к относительным, чем к абсолютным изменениям интенсивности (яркости). Эта закономерность чрезвычайно благоприятна, так как в противном случае с изменением уровня освещения мир представлялся бы нам также сильно изменяющимся. Например, представим себе два оттенка серой поверхности, отражающей соответственно 5 и 10% падающего на нее света. При освещенности 1000 *лк* различие в свете, направляющемся к глазу, составит 50 *лк*, поскольку одна поверхность отражает вдвое больше другой. При освещенности же 100 000 *лк* (летний солнечный свет) различие составит уже 5000 *лк*. Тот факт, что различие между этими двумя серыми оттенками остается зрительно все же приблизительно одинаковым, объясняется тем, что одна из этих поверхностей отражает всегда вдвое больше другой и глаз видит именно это соотношение, а не абсолютную разницу. Однако при очень низких или очень высоких интенсивностях этот закон нарушается и два сравниваемых оттенка выглядят более близкими друг к другу, чем в средней части интервала.



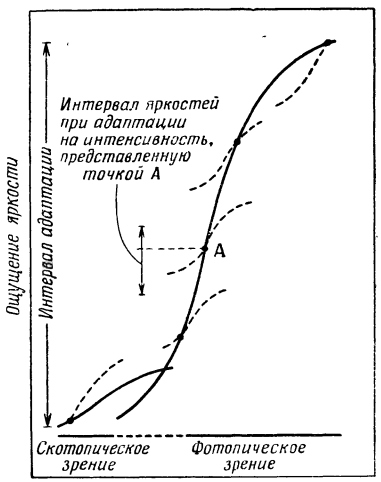
Ф и г. 7.8. Количество различаемых ступеней при переходе к нулевой яркости как функция яркости поля зрения.

Исходя из предположения, что глаз видит не что иное, как количество едва заметных переходов (порогов) от одной интенсивности к другой, и что различия между интенсивностями оцениваются в этих величинах (в порогах), можно построить кривую, показывающую различительную чувствительность глаза при разных уровнях интенсивности. Такая кривая показана на фиг. 7.8, где по горизонтали отложены логарифмы яркостей, а по вертикали — количество

различаемых переходов от каждого данного уровня яркости до совершенно черного.

Данные, по которым построены предыдущие кривые и из которых выведены многие закономерности зрения, были получены при относительно небольшом светлом поле, окруженном большим, совершенно неосвещенным полем. Если же повторить эксперименты при освещенном окружающем поле, получаются совершенно иные результаты. К сожалению, имеется лишь небольшое количество таких данных, и обобщения здесь, следовательно, несколько рискованны.

Представляется, однако, что, если бы такие данные имелись, можно было бы построить кривые, подобные приведенным на фиг. 7.7 и 7.8, но очень сильно ограниченные в отношении интервала интенсивности. Другими словами, наличие окружающей яркости (обычно называемой просто фоном) очень сильно повышает как ту наименьшую интенсивность, которая вообще может быть замечена в центральной части поля, так и ту разницу интенсивностей, которая может быть воспринята как разница. Это положение схематически показано на фиг. 7.9.



Ф и г. 7.9. Кривая, показывающая воспринимаемый интервал яркостей при различных уровнях адаптации.

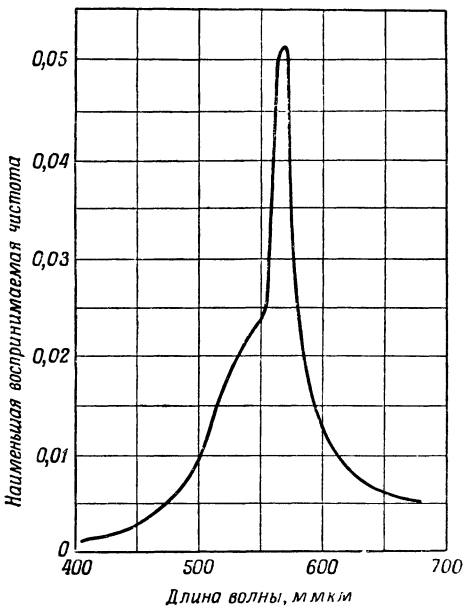
Добавление интенсивности сверх интервала яркостей, характерного для каждого данного уровня адаптации, ведет к возникновению болевых ощущений без возрастания субъективной яркости; ниже этого интервала яркостей видимость равна нулю. (M a r s h a l l W. H., T a l b o t S. A., Biological Symposia, vol. 7, p. 130.)

Практически в освещенной комнате интервал, в который укладываются имеющиеся яркостные различия, намного меньше, чем на кривых фиг. 7.7 и 7.8, построенных по данным, полученным путем *последовательных* установок разделенного пополам поля с черным окружением. Кроме того, интервал от черного до яркости фона при низких уровнях очень невелик, но прогрессивно возрастает с увеличением интенсивности вплоть до такого уровня, при котором глаз испытывает ослепление.

Адаптация

Следующие явления основаны на свойстве зрения, называемом адаптацией. Когда глаз смотрит на объект с данным уровнем яркости достаточно длительное время, он начинает воспринимать

этот уровень как бы за норму и все другие интенсивности оцениваются глазом по отношению к этому уровню, определяющему собой состояние адаптации зрения. При весьма малых яркостях, меньших некоторого определенного процента от яркости поля адаптации, мы воспринимаем объект как черный. Яркости, близкие к имеющемуся уровню адаптации, воспринимаются как белые. Яркости, превышающие уровень адаптации, обычно воспринимаются как источники света.



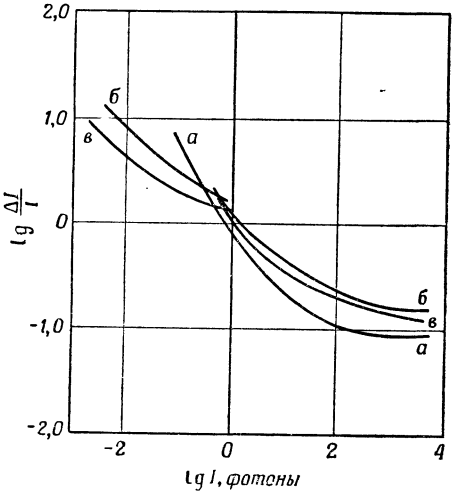
Ф и г. 7.10. Графическое изображение чувствительности глаза к изменениям чистоты в ахроматической точке.

Ординаты показывают наименьшую чистоту, обнаруживаемую при добавлении монохроматического света (с длиной волны, показанной на оси абсцисс) к белому. [P r i e s t I., B r i c k w e d d e F., *J. of Research of the NBS*, 20, 679 (1938).]

Внезапные переходы от одного уровня освещения к другим, резко отличным, могут потребовать некоторого времени для необходимой перенастройки (переадаптации) зрения. Так, переход от полуденного солнца к уровню темной фотокомнаты может потребовать полчаса или больше, чтобы глаз восстановил свою максимальную чувствительность. Переход от этой темной комнаты к яркому дневному свету вызывает болезненную перенастройку глаза, но при этом снижение чувствительности происходит за несколько минут или секунд. Таким образом, очевидно, что способность зрения сохранять чувствительность в широком интервале интенсивностей (порядка нескольких миллионов к одному) достигается за счет изменения общей чувствительности глаза. Весь интервал яркостей, который глаз может различать *одновременно*, составляет около 10 : 1 при наиболее низких уровнях и всего лишь около 1000 : 1 даже при наиболее благоприятных уровнях полного дневного света.

Мы вернемся к этой яркостной адаптации зрения (которая является одним из наиболее важных явлений) в связи с общими вопросами восприятия. Сейчас же необходимо перейти к рассмотрению того, как чувствительность глаза зависит от длины волны

излучения. Уже отмечалось, что в зависимости от уровня яркостей функционирует один из двух видов зрения в отношении реакции на окрашенный свет — скотопический и фотопический — и что они отличаются по относительной чувствительности глаза к различным длинам волн. Важно отметить, что в фотопическом интервале интенсивностей, в котором цвета поверхностей распознаются правильно, относительная спектральная чувствительность в сущности постоянна независимо от уровня адаптации, определяемого превалирующей интенсивностью, и независимо от соответствующей цветовой адаптации, которая будет рассмотрена в следующей главе. Эта чувствительность к разным длинам волн представляет собой, таким образом, относительно постоянное свойство зрения.



Ф и г. 7.11. Различение интенсивностей глазом для красного (*а*), зеленого (*б*) и синего (*в*) света в широком интервале уровней адаптации. [H e c h t S., P e s k i n J. C., P a t t M., *The J. of General Physiology*, **22**, 12 (1938).]

Различия в длинах волн не являются, однако, единственными переменными, которые могут распознаваться глазом, и мы уже рассмотрели замечаемые различия в интенсивностях (яркостях) света, воспринимаемого как белый (бесцветный). Глаз различает также едва заметные количества монохроматической радиации, когда они добавляются к белому, и воспринимает различия в интенсивностях не только при белом свете, но и при монохроматическом, взятом вместо белого.

Первое из указанных свойств зрения известно как чувствительность к различиям в чистоте цветов. Чистота цвета здесь определяется как отношение интенсивности монохроматической составляющей (добавки) к общей интенсивности. На фиг. 7.10 показаны наименьшие замечаемые приращения чистоты для соответствующих длин волн монохроматических излучений.

Различительная чувствительность зрения для света трех различных цветов показана серией кривых фиг. 7.11. Из рисунка видно, что приращение интенсивности, которое может быть обнаружено глазом, зависит не только от цвета (окраски света), но также

и от уровня адаптации зрения. Интенсивности на графике полностью перекрывают интервал, в котором имеет место явление Пуркинье. Граница этого интервала обнаруживается на кривых для синего и зеленого света изломом и частичным перекрытием в зоне перехода от палочкового зрения к колбочковому.

Этим кратким введением необходимо ограничить рассмотрение тех сторон цветового зрения, которые исследуются путем изменения одного из факторов во времени и определения его физических количеств (приращений), вызывающих едва заметные различия в ощущении. Это один из методов, который очень широко использовался в исследованиях зрения, давший сложный лабиринт фактов. Однако один ряд фактов и явлений установлен настолько точно, что можно сказать, что все основы психофизики цвета в их современном состоянии следуют из него одного. Это — ряд результатов, которые были получены в экспериментах по так называемому смешению цветов.

Смешение цветов

Белый свет, проникающий к нам от солнца, представляет собой смесь излучений всех длин волн, которые в интервале от 400 до 700 *ммкм* содержатся в приблизительно равных количествах. Если луч этого света пропустить через щель и призму, образуется полоса света (спектр), содержащая все длины волн, расположенные по порядку, но кажущаяся, однако, состоящей только из нескольких отдельных цветов. Ньютон, впервые осуществивший такой опыт, разделил цвета на семь вследствие своего убеждения в мистических свойствах семерки, но большинство наблюдателей при нормальной интенсивности (яркости) видит шесть цветов и всего лишь три в случае, если интенсивность света мала.

Юнг и позднее Максвелл установили и продемонстрировали, что если выбрать всего лишь три монохроматических световых потока, далеко рассредоточенных в спектре, и спроецировать их на белую поверхность в виде световых пятен, наложенных друг на друга, то можно подобрать эту смесь трех цветов таким образом, чтобы она выглядела как любая другая часть спектра. Дальнейшие исследования показали, что это явление имеет фундаментальное значение, и из него вытекают наши основные представления о цветовой чувствительности зрения. Не пытаясь проследить историю исследований, мы можем коротко сформулировать следующие результаты:

1. Смесь излучений двух произвольных длин волн дает цвет, лежащий в спектре между этими длинами волн, за исключением

краев спектра, которые при смешении образуют ряд пурпурных цветов (родственных фиолетовым в предельно коротковолновой области, около 400 *ммкм*) [1]. Точная длина волны воспринимаемого цвета смеси изменяется вместе с относительной интенсивностью двух смешиваемых излучений, постепенно переходя от длины волны одного к длине волны второго по мере изменения его доли от 0 до 1.

2. Существует целый ряд пар монохроматических световых излучений, которые при смешении могут давать белый свет. Эти пары называют взаимно-дополнительными.

3. Для средней (зеленой) части спектра дополнительных длин волн не существует.

4. Любой известный цвет, кроме цветов, которые мы называем пурпурными, может быть воспроизведен путем смешения белого света со светом соответствующей длины волны.

5. Все цвета, которые не могут быть получены смешением монохроматического и белого света (пурпурные), можно превратить в белый путем добавления к ним одного из цветов зеленой части спектра (т. е. все они являются *дополнительными* к цветам этой части спектра).

Указанные положения являются основой всех современных систем измерений цвета и могут считаться наиболее точно установленными фактами в области цветового зрения. Далее в настоящей главе приводится обзор некоторых следствий, вытекающих из этих положений. Собственно схемы цветовых измерений будут рассмотрены в гл. XII.

Предварительно важно заметить, что приведенные выше закономерности относятся к физической смеси любых двух световых потоков, которая для нормального наблюдателя выглядит *идентичной* данному цвету. Мы не будем пока останавливаться на вопросах восприятия цвета предмета. Видимый цвет смеси *пáры* световых потоков может заметно изменяться в зависимости от условий. Однако возможно рассчитать такое распределение энергии по спектру, которое будет идентично сравниваемому цвету при любых условиях наблюдения.

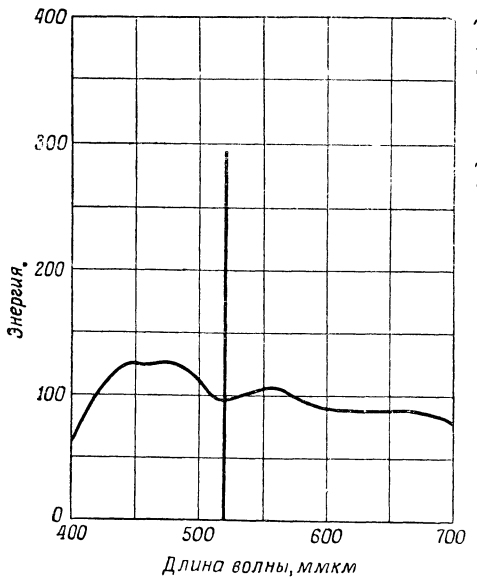
Мы хотим вновь коснуться результата, упоминавшегося ранее: любой цвет может быть воспроизведен (подобран) смешением трех подходящим образом выбранных окрашенных световых потоков. Этот результат вытекает из пяти основных положений, приведенных выше.

---

[1] Следует иметь в виду, что цвет смеси двух монохроматических излучений совпадает по цветовому тону с монохроматическим излучением промежуточной длины волны, но обычно имеет значительно меньшую насыщенность.— *Прим. ред.*

Цвет смеси любой близкой пары спектральных линий лежит в спектре между ними (п. 1). Если линии пары достаточно далеко отстоят друг от друга в спектре, они образуют белый цвет (п. 2). Если они расположены в спектре еще дальше друг от друга, они образуют пурпурные цвета, которые являются дополнительными для зеленой части спектра (п. 5).

Посмотрим теперь, какое значение имеют эти положения при подборе (воспроизведении) любого цвета путем смешения монохроматического света различных длин волн. Возьмем смесь монохроматического и белого световых потоков (фиг. 7.12) и станем подбирать те цвета, которые можно точно отождествить с цветом этой смеси.

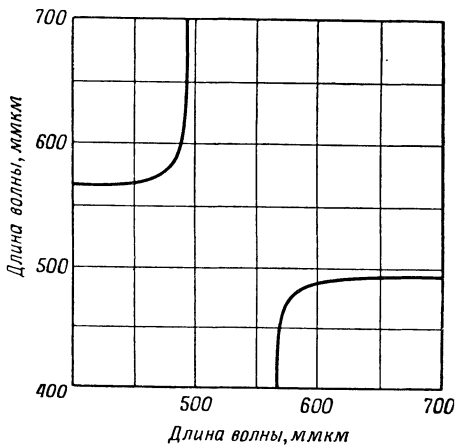


Фиг. 7.12. Энергетическая кривая зеленого света, полученного смешением стандартного источника *C* (МКО) и монохроматической линии с длиной волны 520 *ммкм*.

Энергия непрерывного спектра указана из расчета на полосы по 10 *ммкм*.

Из п. 2 следует, что белая часть смеси сама может быть воспроизведена любой парой или парами взаимно-дополнительных спектральных линий. Соотношение между взаимно-дополнительными длинами волн показано на фиг. 7.13. Любая пара линий или любая группа пар, описываемых этими кривыми, дает белый свет. Все комбинации, приведенные на фиг. 7.14, имеют цвет, зрительно одинаковый с цветом смеси, приведенной на фиг. 7.12. На фиг. 7.14,*в* большое количество взаимно-дополнительных пар линий образует в своей совокупности две непрерывные спектральные области. На фиг. 7.14,*а* — *в* собственно монохроматический свет еще присутствует. Однако в этом нет необходимости, так как такой же цвет могут дать пары смежных линий, и, таким образом, группы, показанные на фиг. 7.15, могут заменить монохроматическую линию в смесях одинакового цвета. Эти пары линий, дающие один и тот же цвет, могут быть опять-таки сгруппированы в серию, образующую, как показано на фиг. 7.16, непрерывную спектральную зону в районе монохроматической линии того же цвета.

Так как для точного воспроизведения сравниваемого цвета требуется определенное *соотношение* интенсивности линий в каждой отдельной паре, а не их абсолютные величины, очевидно, что указанные выше непрерывные зоны могут быть выполнены почти любой формы, удовлетворяющей этому условию требуемых соотношений. Такая возможность еще более обосновывается тем фактом, что любая пара линий по цветовому тону тождественна одной линии, лежащей между ними, и что эта пара может быть далее смешана с подобной же другой парой, чтобы получить тот же результат, как если бы вместо пар имелись *только* промежуточные линии. В свою очередь и пара этих промежуточных линий дает тот же эффект, как одна-единственная линия между ними. Описанные возможности показаны на фиг. 7.17, где пары линий *а* — *б* и *в* — *г* воспроизводят соответственно цвет линий *д* и *е*, а вся результирующая смесь дает цвет линии *ж*.

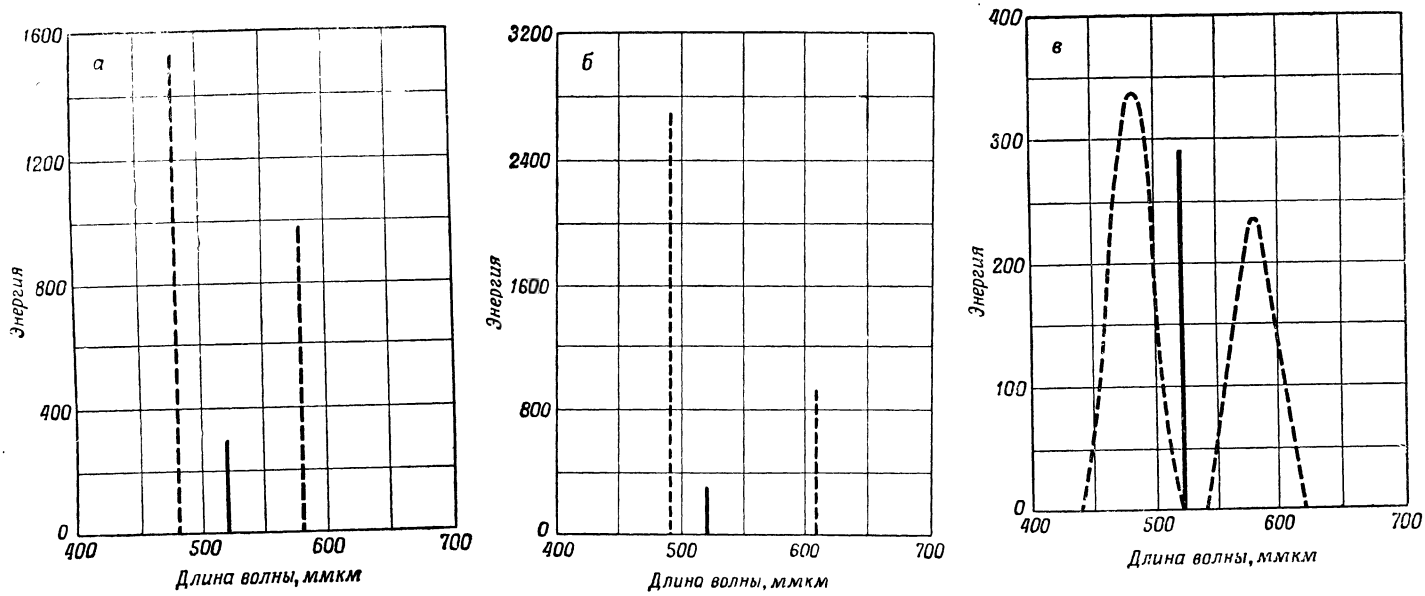


Ф и г. 7.13. Кривая, показывающая соотношение дополнительных длин волн при источнике *С* (МКО), принятом в качестве нейтрально белого.

Всякая линия, проведенная перпендикулярно к абсциссе в любой точке, кроме интервала 492—568 *ммкм*, пересекает кривую в точке, соответствующей по оси ординат длине волны, дополнительной к взятой по оси абсцисс.

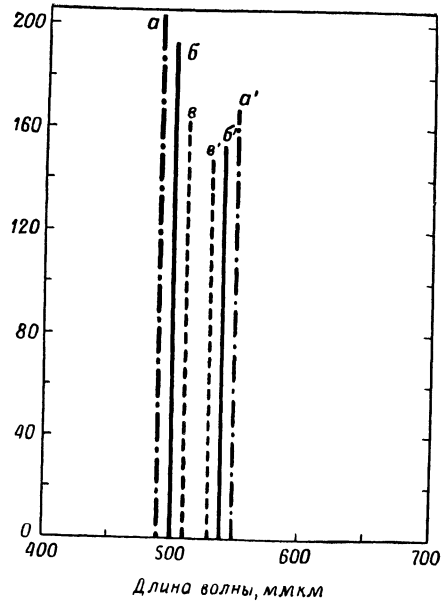
Очевидно, что смесь излучения одной длины волны с белым светом можно уравнять по цвету с *бесконечным* числом различных вариантов распределения энергии по спектру, которые все будут выглядеть совершенно одинаковыми. Любой цвет может быть воспроизведен (уравнен) бесконечным количеством других спектральных распределений энергии.

Единственное ограничение вариаций таких смесей заключается в получаемой при этом «чистоте» цвета. Эта чистота определяется как доля (процент) требуемого монохроматического света, которая должна быть примешана к белому свету, чтобы воспроизвести данный цвет. Заметим, что это чисто физическое определение, поскольку чистота данного цвета определяется здесь не по его виду (восприятию), а из условия *сравнения* подбора смеси такого же цвета. Чистота монохроматического света составляет при таком ее выражении 100%, а белого — 0%. Позднее мы увидим, что не все спектральные линии выглядят одинаково насыщенными по цвету,

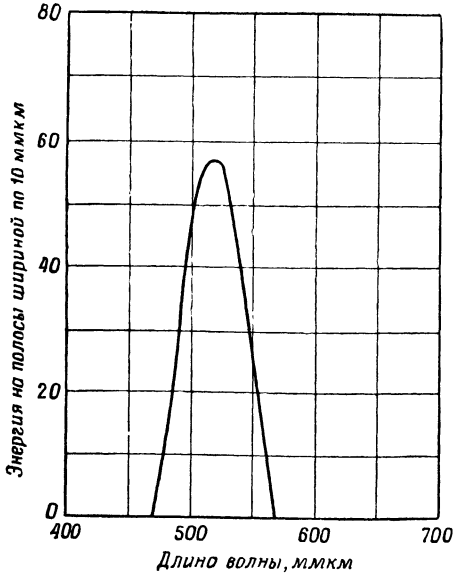


Ф и г. 7.14. Три различных распределения энергии, визуально тождественных свету по фиг. 7.12 в отношении цветового тона и яркости.

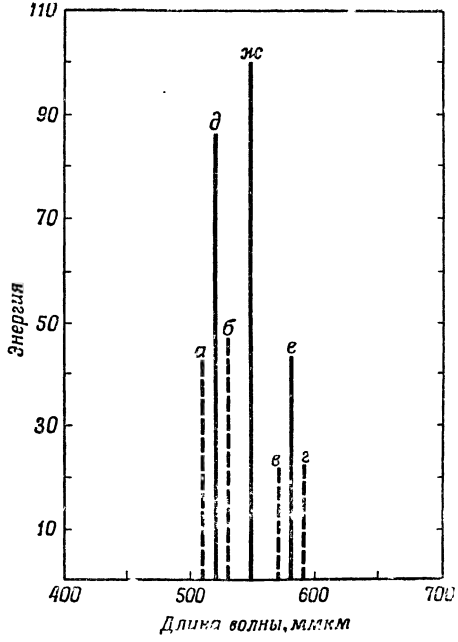
Произвольные единицы энергии на *а* и *б* одинаковы, так что можно сравнивать соотношение энергий. Энергия непрерывного спектра (*в*) указана из расчета на полосы шириной по 10 *ммкм*.



Ф и г. 7.15. Три пары монохроматических линий: *а* и *а'*, *б* и *б'*, *в* и *в'*, которые визуально тождественны монохроматической линии на фиг. 7.12 по цветовому тону и яркости, но не по чистоте.



Ф и г. 7.16. Непрерывная энергетическая кривая, визуально тождественная монохроматической линии на фиг. 7.12 по цветовому тону и яркости, но не по чистоте.



Ф и г. 7.17. Относительные энергии различных визуально тождественных комбинаций монохроматических линий, в которых линии $а + б = д$, $в + г = е$, $д + е = ж$.

Все цветовые тождества здесь достигаются в отношении яркости и цветового тона, но не в отношении чистоты.

но по только что принятому определению все монохроматические линии считаются одинаковой чистоты (100%).

Хотя, смешивая две спектральные линии, можно воспроизвести цветовой тон третьей, в общем случае такая смесь имеет более низкую чистоту и для получения *точного* цветового тождества приходится к этой третьей линии добавлять белый. Когда вместо монохроматического в смесях применяют свет с непрерывным спектром, указанное понижение чистоты может стать чрезвычайно сильным.

Мы можем теперь перейти к рассмотрению ряда систем, позволяющих воспроизводить *любые* цвета. Прежде всего, как мы уже установили, цветовое тождество может быть достигнуто выбором подходящей длины волны и добавлением белого света (или аналогичным выбором дополнительной длины волны, добавляемой к самому образцу, т. е. к данному цвету). Кроме того, цвет образца можно воспроизвести, если к свету одной произвольно выбранной длины волны подобрать свет с такой длиной волны, чтобы в смеси с первым или с цветом образца он дал тождество двух сравниваемых полей. Наконец если произвольно подобраны любые три цвета, дающие при смешении в подходящей пропорции белый, то смешением этих трех цветов в соответствующей пропорции можно будет также получить любой цвет.

Последняя система представляет особый интерес. Заметим, что *единственное* требование к ней состоит в том, чтобы излучения с тремя выбранными длинами волн, взятые в надлежащем соотношении, образовывали белый цвет. Они воссоздают также и *любой возможный цвет*, за исключением точного воспроизведения чистоты некоторых цветов. Это исключение означает, что для получения цветового тождества при некоторых очень чистых цветах необходимо к образцу добавлять белый. Это явление (воспроизведение любого цвета смесью трех) положило начало всем так называемым аддитивным процессам цветопередачи (таким, в которых изображение образуется аддитивным смешением окрашенных световых потоков) и явилось также источником бесконечных гипотез о самом механизме зрения. Обычно делается заключение, хотя и не вполне логичное, что если для воспроизведения всех возможных цветов достаточно лишь трех цветов, то должны быть также только три процесса в зрительном органе, дающие восприятие цвета. Этот вопрос горячо обсуждался в течение двух столетий, но никаких до конца убедительных экспериментов не было осуществлено[1]. К счастью, чтобы понять имеющиеся опытные факты, нет необходимости в том, чтобы какая-нибудь из теорий стала общепринятой, и мы перейдем к дальнейшему, не останавливаясь на разногласиях.

[1] Возможность воспроизведения любого цвета путем аддитивной смеси трех основных цветов позволяет совершенно строго доказать справедливость трехкомпонентной теории цветового зрения.— *Прим. ред.*

Возвращаясь к факту, что любой цвет может быть воспроизведен соответствующей смесью всего лишь трех спектральных линий, при условии что к образцу можно при необходимости добавлять белый, несколько обобщим это положение, пользуясь понятиями, принятыми выше. Из того, что уже было сказано, очевидно, что каждая из трех спектральных линий в системе может быть уравнена (заменена) бесконечным числом вариантов распределения энергии по спектру. Каждая линия в такой системе может быть, кроме того, заменена непрерывным распределением, которое точно воспроизводит ее цвет, за исключением чистоты (содержание белого)[1]. Поскольку существует бесконечное число систем трех монохроматических линий, способных воспроизводить все цвета, и бесконечное число непрерывных распределений, которые могут воспроизвести цвет каждой из трех линий в любом варианте такой системы, очевидно, что *теоретически* существует трижды бесконечный ряд тройственных систем (триад), удовлетворяющих этим условиям. Однако при этом не следует забывать о возможном снижении чистоты цвета в отдельных вариантах воспроизведения; если взятые непрерывные распределения очень широки, чистота получаемых цветов становится столь низкой, что они не представляют практического интереса.

На основании вышеизложенного ясно, что каждый из трех цветов системы, позволяющей путем соответствующего их смешения воспроизводить всевозможные цвета, вовсе не должен обладать какими-то уникальными свойствами. Это разъяснение стало в значительной мере необходимым в связи с тем, что такие три цвета в разных системах стали называть «первичными» цветами, поскольку в каждой данной цветовой смеси, которую они составляют, первичные цвета берутся первыми, а цвет смеси получается вторым, но *ни по какой-либо другой причине*. Слово «первичные» (цвета) будет применяться и в этой книге, так как оно обычно встречается в литературе. В любом конкретном случае понятие «первичные» означает просто цвета, взятые для образования цветовых смесей.

Кривые цветового сложения

Проанализируем теперь так называемые кривые цветового сложения для глаза. Пусть мы имеем произвольную систему трех цветов, удовлетворяющих требованию образования белого в соответствующей удобной смеси и являющихся каждый в отдельности вполне чистым цветом. С помощью соответствующего прибора мы

[1] Поскольку невозможна точная замена монохроматического излучения непрерывным без уменьшения чистоты цвета, последующие рассуждения автора об «утроении бесконечного ряда» лишены смысла.— *Прим. ред.*

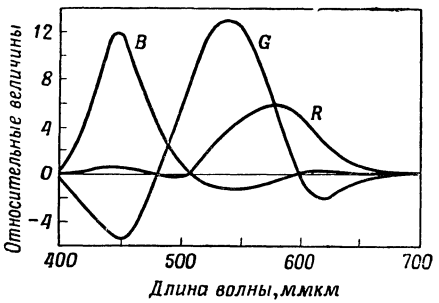
можем одну половину небольшого поля освещать чистым монохроматическим светом, а вторую — светом изменяемой смеси этих трех цветов. Если мы имеем еще возможность к монохроматической половине поля добавлять белый, то, как известно из предыдущего, можно получать точное уравнивание полей в пределах всего видимого спектра монохроматических излучений. За последние 50 лет это проделывалось много раз. Результаты всякий раз представлялись в виде системы величин, показывающих, сколько было взято каждого из трех цветов в смеси, чтобы получить цветовое равенство полей; по этим данным могут быть построены кривые, называемые кривыми сложения для глаза. Техника измерений у каждого экспериментатора была несколько иной. Однако в самом начале важно уточнить, что эти кривые *совершенно условные* в том смысле, что если в качестве первичных были бы выбраны три других цвета, то результаты были бы также совершенно отличными. С другой стороны, в равной мере очевидно, что *в отношении к данной частной триаде первичных цветов* эти кривые описывают цветосмесительные свойства зрения. Однако поскольку имеется бесконечное множество систем (триад) таких кривых, отличающихся друг от друга, но описывающих одни и те же свойства зрения, по этим данным невозможно установить с определенностью, каковы же эти свойства. Требуются какие-то другие критерии, чтобы получить кривые чувствительности приемников глаза человека[1]. Зрительный механизм, с помощью которого глаз оценивает цвет, а также видит все это бесконечное множество спектральных распределений, нам точно неизвестен. При существующем сейчас положении кривые цветового сложения представляют собой изолированные, хотя и хорошо изученные данные, и это именно так, независимо от того, последователем какой теории цветового зрения является наш читатель.

Система кривых сложения, взятая из стандартизированных данных МКО, воспроизведена на фиг. 7.18. Каждая кривая представляет собой относительное количество одного из трех первичных цветов, использовавшихся для образования смеси. Кривые построены таким образом, что при любой длине волны ординаты трех кривых показывают относительные количества трех соответствующих первичных цветов, необходимые для получения цветового тождества между смесью и монохроматическим светом данной длины волны. Там, где кривые идут ниже нулевой горизонтальной ли-

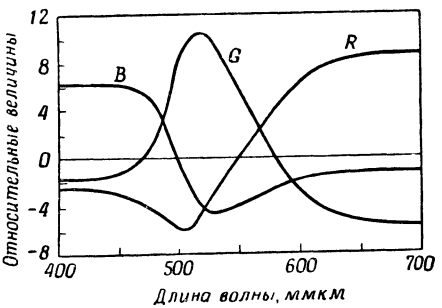
[1] Следует иметь в виду, что кривые сложения, полученные при различных первичных цветах, не независимы, а связаны между собой линейными соотношениями. Поэтому данные расчета цветовых равенств на основе любой системы кривых должны давать одинаковые результаты. Использование особенностей зрения наблюдателей с частичной цветовой слепотой — дихроматов — позволяет получить из кривых сложения действительные кривые спектральной чувствительности приемников глаза.— *Прим. ред.*

нии, первичный цвет добавляется не к смеси, а *к образцу* (т. е. к монохроматическому полю), чтобы снизить его чистоту настолько, чтобы уравнивание полей стало возможным. Для построения кривых фиг. 7.18 в качестве первичных цветов были взяты монохроматические излучения с длинами волн 480, 510 и 600 *ммкм*.

Кривые сложения для трех других первичных цветов показаны на фиг. 7.19. Все эти системы кривых имеют интересное свойство: если одну из систем рассматривать как эталонную, то другие могут быть рассчитаны непосредственно на основании данных о распределении энергии применяемых первичных цветов. Эта возможность очевидна из того факта, что каждый первичный цвет *новой* системы



Ф и г. 7.18. Кривые сложения трех первичных цветов МКО, преобразованные для реальных источников.



Ф и г. 7.19. Кривые сложения трех первичных цветов МКО, преобразованные для реальных источников, отличных от источников фиг. 7.18.

Эти кривые относятся к первичным цветам с сильно пониженной чистотой, тогда как первичные цвета фиг. 7.18 имеют чистоту 100%.

(триады) может быть воспроизведен соответствующей смесью трех цветов стандартной системы и эти *смеси* можно рассматривать в качестве первичных для *новой* системы. Математически все сказанное сводится к решению системы трех уравнений с тремя неизвестными. Поскольку эта возможность существует для любой системы *реальных* первичных, она справедлива также и для *воображаемых* первичных цветов, вследствие чего возможно рассчитать систему кривых сложения для трех первичных цветов, которые обладают более высокой чистотой, чем любые цвета в спектре. Такой пересчет приводит к тому, что теперь не будет необходимости ни один из первичных цветов прибавлять когда-либо к монохроматическому образцу. Система таких кривых сложения не имеет отрицательных компонент и цветовые расчеты в ней значительно упроща-

ются. Одна из систем такого типа принята в качестве международного стандарта и будет рассмотрена более детально в гл. XIII.

В заключение желательно кратко указать, каким образом возможно рассчитать, будут ли какие-либо два распределения энергии выглядеть одинаковыми по цвету, и отметить общий способ, которым возможно определять, специфицировать цвета так, чтобы все они были приведены к единой основе для возможности их сравнения.

Предположим, что даны две совершенно различные по виду кривые распределения энергии по спектру, и требуется узнать, будут ли эти распределения тождественны по цвету, если свет, который они представляют, наблюдать рядом на двух половинах поля. Для этого каждую из имеющихся кривых распределения следует проанализировать последовательно (одну длину волны за другой), чтобы определить, какая смесь первичных цветов некоторой произвольной системы требуется для того, чтобы воспроизвести цвет излучения с данной кривой. Если результаты показывают, что для каждой кривой требуется одна и та же смесь, оба распределения энергии будут тождественны по цвету. Если же требуются различные соотношения первичных цветов, цвет сравниваемых спектральных распределений *не одинаков*. Расхождение соотношений первичных цветов указывает направление цветового различия между двумя распределениями. Чтобы облегчить задачу определения цветовых различий, а также сделать возможным численное определение (выражение) всех цветов, применяется несколько систем. Все они основываются или на описанной выше системе «монохроматический плюс белый», или на произвольной системе «трех первичных» цветов. Имеются бесконечные варианты таких систем, но только немногие получили всеобщее признание.

Прежде чем перейти к рассмотрению того, какой *вид* для глаза имеют излучения с различным распределением энергии по спектру и какие переменные факторы участвуют в образовании их воспринимаемого вида, полезно рассмотреть психофизические переменные, указанные в настоящей главе, чтобы стала очевидной разница между переменными факторами психофизического и психологического характера.

Бесконечное разнообразие способов, при помощи которых можно составить спектральные распределения энергии, тождественные по цвету с данным распределением, делает несколько затруднительными те обобщения, которые способствовали бы наглядности проявляющихся здесь закономерностей. Пожалуй, единственно законным здесь будет лишь то обобщение, что производятся именно *три* физических изменения (регулировки) в свете, чтобы получить цветовое уравнивание его с образцом.

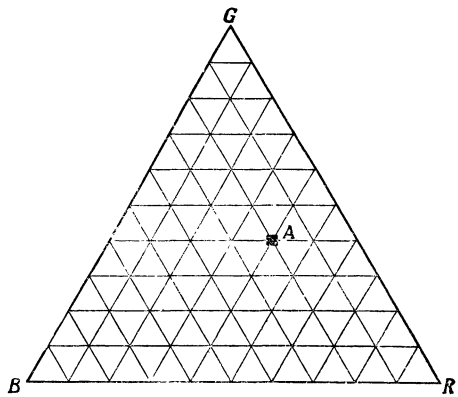
Что́ подразумевается под физическими переменными, описать не легко. В системе «монохроматический плюс белый» такими пере-

менными являются длина волны, соотношение интенсивностей монохроматического и белого и общая полная интенсивность. В любой системе «трех первичных» ими являются величины (интенсивности) каждого из первичных или каких-либо производных от них. В математическом выражении цветовое зрение является функцией трех независимых переменных, необходимых для характеристики (специфицирования) цветовых раздражителей.

Таким образом, любая триада независимых переменных может быть основой системы для выражения цветных раздражителей, и слово «система» означает просто соглашение, по которому ряд из трех чисел определяет собой цвет раздражителя. Исторически наиболее ранней из таких систем и с современной точки зрения наиболее обычной является численное выражение интенсивностей триады произвольно выбранных первичных цветов.

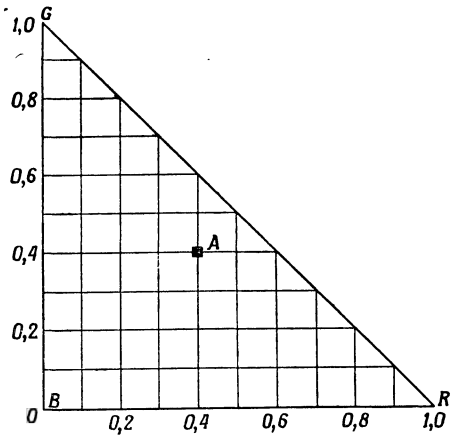
Максвелловский треугольник

Максвелл значительно упростил эту систему. Поскольку цветность, как таковая, не кажется сильно изменяющейся при изменении общей интенсивности, он предложил, чтобы цветовая часть характеристики света (цветность) выражалась отдельно от интенсивности с помощью только двух переменных. Он выбрал в качестве этих двух переменных отношения двух из трех интенсивностей к общей (суммарной) интенсивности трех первичных цветов. Далее он установил, что три отношения, дающие в сумме единицу, могут быть нанесены одновременно на треугольник для того, чтобы получить простое наглядное изображение природы тройных смесей. Такой график, показанный на фиг. 7.20, известен как треугольник Максвелла. Цвет, обозначенный на графике точкой A, рассчитан и нанесен следующим образом. Пусть экспериментально установлено, что для воспроизведения некоторого конкретного цвета потребовались одна единица синего, две единицы зеленого и две красного. Эти единицы выбраны из условия получения белого таким образом, что одна единица красного, одна зеленого и одна синего при смешении



Ф и г. 7.20. Цветовой треугольник Максвелла.

дают белый. Они являются, таким образом, скорее психофизическими единицами, чем чисто физическими единицами энергии. Сумма интенсивностей в нашем примере равна пяти единицам. Синий составляет $^1/_5$ всей суммы, зеленый $^2/_5$ и красный $^2/_5$. На треугольном графике этот цвет изобразится точкой, отстоящей на $^2/_5$ от стороны треугольника до противолежащей красной вершины и на $^2/_5$ от другой стороны треугольника до противолежащей зеленой вершины. Одновременно вследствие свойств равностороннего треугольника эта точка непременно будет отстоять на $^1/_5$ от третьей стороны треугольника до соответствующей противолежащей (синей) вершины. Сумма трех перпендикуляров, опущенных из любой точки внутри равностороннего треугольника, одинакова для всех точек. Если эта сумма равна единице, то каждой точке внутри треугольника соответствует своя тройка долей единицы.



Ф и г. 7.21. Цветовой треугольник Максвелла, преобразованный для прямоугольной системы координат.

Практически системы, нашедшие применение в настоящее время, строятся не в максвелловском, а в простом прямоугольном треугольнике. Если не учитывать общую интенсивность, то необходимы только две переменные величины, которые могут быть нанесены в обычных прямоугольных координатах. График фиг. 7.20 повторен на фиг. 7.21 в прямоугольной системе, и можно видеть, что этот график выражает такие же характеристики цветов, как и первоначальный.

Как увидим в последующих главах, этот способ построения графика используется в тщательно разработанной колориметрической системе МКО. Однако важно установить, что обозначает каждая точка в таком треугольнике.

Тот факт, что два цвета, наносимые на графике в одной и той же точке, будут визуально одинаковы[1]), наводит на мысль, что всякая точка на графике некоторым образом специфицирует воспринимаемый *вид* цвета.

---

[1]) Два цвета, изображаемые одной и той же точкой цветового графика, имеют одинаковые цветности, не могут отличаться при визуальном наблюдении в случае, если их яркости неодинаковы.— *Прим. ред.*

Однако это неверно, за исключением вполне определенных условий. Спектральное распределение энергии, для которого была рассчитана точка, является одним из бесконечного множества распределений, выглядящих для нормального наблюдателя одинаковыми по цвету. Здесь не сделано никаких утверждений относительно возможных *психологических* действий, которые могут влиять на наблюдателя. Спецификация является чисто *психофизической*; установлены свойства лучистой энергии применительно к глазу, рассматриваемому в качестве рецептора с фиксированными постоянными чувствительностями. При этом ни коим образом не берется в расчет то восприятие, которое может возникнуть в мозгу наблюдателя на основе сообщений, поступающих от такого рецептора. В следующей главе мы учтем и это восприятие и увидим, какие системы могут быть разработаны на его основе. Будет выявлено также, что имеется мало сходства между обоими видами систем. Читатель должен понимать, что это несоответствие существует, несмотря на тот факт, что цвета можно специфицировать и устанавливать их идентичность, не считаясь с создаваемым ими впечатлением. Можно надеяться, что в конце концов чисто психофизическая спецификация будет включать в себя также и воспринимаемый цвет предметов. Это будет достигнуто, если будет найден способ, которым цветовые *различия* смогут специфицироваться так, чтобы они могли сопоставляться и сравниваться *для всех цветов*. В настоящее время наблюдается прогресс в этом направлении.

ГЛАВА VIII

Визуальная оценка цвета

До сих пор мы рассматривали свет и цвет или как чисто физические понятия, определяемые спектральным распределением энергии, или как психофизические понятия, т. е. как распределение энергии, оцененное глазом — приемником излучения с фиксированными характеристиками. В этой главе необходимо рассмотреть вопрос восприятия цвета наблюдателем.

Восприятие цвета

Для того чтобы в вопрос о цвете включить ощущение наблюдателя, необходимо рассмотреть целый ряд новых явлений, лежащих большей частью в области психологии. Когда свет, состоящий из энергии исключительно коротковолновой части спектра, воспринимается наблюдателем с нормальным цветовым зрением, он обычно видит синий цвет. Однако, если наблюдаемая площадь невелика и окружена ярким излучением зеленого цвета, наблюдатель обычно воспринимает это же излучение как пурпурное, а при пурпурном фоне возникает ощущение зеленого цвета. Насколько известно в настоящее время, этот эффект является в такой же степени свойством глаза, как и любая другая его характеристика, однако он обычно рассматривается как психофизический эффект. *Интерпретация* получаемого мозгом сигнала (синий, зеленый или пурпурный) является определенной частью психологии. Кроме того, существуют условия наблюдения, при которых видимый наблюдателем цвет не может быть заранее *определен*. Следовательно, восприятие цвета не может всегда быть полностью определено из чисто физических условий. Эти случаи обычно наблюдаются тогда, когда имеются, так сказать, два или более способов наблюдения предмета, и *способ*, действительно выбираемый наблюдателем, зависит от его отношения к рассматриваемому явлению.

Эти эффекты представляют собой один из аспектов чистой психологии цвета. Существует много других аспектов, которые также не могут быть полностью сведены к физическим, например эмоциональная реакция на цвет. Их можно классифицировать как реакции *организма* наблюдателя на цвет в отличие от его истолковательной реакции.

Цветовой тон, насыщенность и светлота

Свет определенного спектрального состава, попадая в глаз наблюдателя, вызывает ощущение некоторого цвета. Если распределение энергии этого света будет систематически изменяться, то соответствующим образом будет систематически изменяться и ощущение цвета. Тщательное изучение показывает, что эти воспринимаемые вариации могут быть описаны в терминах трех цветовых ощущений, определяемых как «цветовой тон», «насыщенность» и «светлота».

Как и все другие, эти ощущения трудно описать, не пользуясь вариациями физических стимулов, их вызывающих. В разговоре мы можем описать наблюдаемый цвет другому человеку, только пользуясь реальными физическими объектами или стимулами, определяя, например, зеленый цвет как цвет травы, а красный как цвет розы. Однако из этого не следует делать неправильный вывод о том, что вследствие этого существуют простые соотношения между стимулом и ощущением цвета. Важно отметить, что условия наблюдения в такой же степени определяют воспринимаемый цвет, как и сам вызывающий его стимул.

С учетом этих ограничений три основные переменные цвета могут быть описаны как ощущения. Конечно, наиболее важное значение имеет цветовой тон. *Цветовой тон* (оттенок), можно сказать, является основным качественным фактором, определяющим цвет, благодаря которому мы можем называть цвет красным или зеленым. Цветовой тон — наиболее заметный фактор, изменяющийся при изменении длины волны видимого спектра, и поэтому он является тем качеством, которое позволяет описывать цвет в терминах длины волны монохроматического излучения, с которым он совпадает. Невозможно дать более точное определение любому ощущению цвета, не введя слова, мало понятные читателю. Возможно, цветовой тон следует просто определить как главную (но не единственную) характеристику цвета, благодаря которой цвета получают названия. В наилучших условиях наблюдения глаз может различить более 200 различных цветовых тонов.

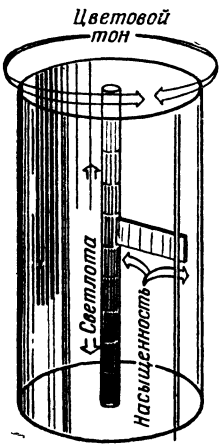
Насыщенность лучше всего может быть определена как процентное содержание цветового тона в цвете[1]). В обычной речи насыщен-

[1]) Данное автором определение насыщенности цвета неточно. Под насыщенностью цвета обычно понимают отличие данного цвета от белого той же яркости, выраженное в числе цветовых порогов различения. Определение автора ближе к психофизическому понятию чистоты цвета, которая определяется отношением яркости монохроматического излучения к яркости смеси монохроматического и белого излучений, совпадающей по цветности с данным излучением. Чистота цвета всех монохроматических излучений равна единице, в то время как они значительно различаются по своей насыщенности.— *Прим. ред.*

ность данного цвета описывается словами «тусклый», «бледный», «слабый» или «сильный» в соединении с названием цветового тона.

Понятие «насыщенность» приблизительно аналогично понятию «чистота химической смеси» или «концентрация» раствора. Совокупность понятий «насыщенность» и «цветовой тон» (цветность излучения) определяет то, что может быть названо качественной оценкой ощущения, вызываемого светом.

Светлота — третья переменная — может быть определена как количественная характеристика ощущения. Однако важно указать, что это определение дано только в терминах ощущения безотносительно к любой оценке, базирующейся на сравнении с другими объектами. Легко показать, что непосредственное заключение о светлоте безотносительно к другим наблюдаемым поверхностям может значительно отличаться от изложенной выше оценки. В частности, необходимо тщательно различать светлоту света, поступающего в глаз непосредственно от объекта, и кажущийся относительный коэффициент отражения этого объекта по сравнению с другими объектами. Эта разница чисто психологическая, т. е. определяется позицией наблюдателя и может быть описана как разница в кажущейся светлоте, вызываемая отношением наблюдателя к наблюдаемому им объекту. Чтобы избежать недоразумений при рассмотрении этой разницы (см. гл. X), необходимо использовать дополнительное понятие «видимая яркость» (терминология Американского оптического общества), определяемое как кажущийся коэффициент отражения поверхности в данных условиях наблюдения. Вообще светлота и видимая яркость различаются в том случае, если наблюдается заметная неравномерность освещения рассматриваемой сцены.



Ф и г. 8.1. Цветовое тело.

Светлота изменяется вдоль вертикальной оси, цветовой тон определяется углом в горизонтальной плоскости, а насыщенность зависит от расстояния от вертикальной оси.

Таким образом, три переменные — цветовой тон, насыщенность и светлота — полностью определяют качественную и количественную характеристики цвета как ощущения. Ясно, что эти три переменные могут быть положены в основу трехмерной системы для графического изображения или описания определенного цвета. Например, все цвета можно представить себе распределенными внутри так называемого цветового тела, в котором светлота изменяется по вертикали, цветовой тон определяется положением относительно центра в горизонтальной плоскости, а насыщенность из-

меняется в зависимости от расстояния по перпендикуляру, проведенному к вертикальной оси тела. Схематически такое цветовое тело показано на фиг. 8.1. Вертикальная линия, проходящая через центр тела, соответствует цветам с нулевой насыщенностью и, следовательно, не имеющим цветового тона, но изменяющимся по светлоте. Вдоль любой радиальной линии, перпендикулярной оси светлоты, насыщенность возрастает с увеличением расстояния от центра, а цветовой тон изменяется с изменением углового положения этой линии при наблюдении сверху или снизу рисунка. Такая система для отражающих цветных образцов поверхностей была разработана комиссией Манселла и будет рассмотрена в гл. XIII.

Цветовые круги

При рассмотрении психофизических характеристик цвета была показана возможность изображения цветности в двухмерном пространстве в координатах, дающих отношение основных цветов аддитивной системы. Цветовой тон и насыщенность также можно изобразить на плоском графике (светлотой при этом пренебрегают). Уже много лет назад было показано, что всевозможные оттенки цвета можно изобразить на плоскости в виде замкнутой окружности. Если все цветовые тона спектра, а также оттенки, которые могут быть получены смешением излучений концов видимого спектра, т. е. синего и красного, расположить по окружности, то в этом случае будут охвачены все возможные цветовые тона. Такое построение называется цветовым кругом и, очевидно, является основанием для углового расположения цветовых тонов в цветовом теле, изображенном на фиг. 8.1. В таком цветовом круге насыщенность цвета возрастает по направлению от центра и любой цвет может быть изображен точкой внутри круга. Аналогичный метод изображения цвета уже был ранее рассмотрен для аддитивной цветовой системы.

Однако, говоря о цветовом тоне и насыщенности, мы рассматриваем психологические переменные, т. е. *мысленные* восприятия, которые невозможно *измерить*. При использовании аддитивной цветовой системы мы могли определить непосредственно *количество* основных цветов и их точные отношения. При рассмотрении психологической системы, как это имеет место со всеми ощущениями, такие измерения выполнить невозможно. Поэтому попытаемся использовать вместо них целую группу новых понятий, чтобы разработать шкалы для изображения наших данных. Трудно выразить словами цвет синего объекта, если его не сравнивать с другим синим объектом. Даже в этом случае все, что мы можем сказать, сводится к тому, что объект *более* синий или *менее* синий, т. е. имеет бóльшую или меньшую насыщенность. Мы не можем установить

с какой-либо точностью, *насколько* он более синий или менее синий. Соответственно для того, чтобы получить шкалу, на которую можно было бы нанести такие данные (и, таким образом, наблюдать и сравнивать), необходимо использовать совсем отличный от прежнего и менее удовлетворительный метод. Можно достаточно точно установить, когда два цвета кажутся отличающимися друг от друга, так же как два других, и это утверждение можно уточнить при помощи приборов при условии, что различие в цвете мало. Можно установить также достаточно точно так называемое «едва воспринимаемое различие» между цветами, если имеется возможность варьировать это различие от нуля до некоторой величины.

Для количественных целей могут быть использованы два метода, известных как метод «едва заметного порога» и метод «равных разностей». При помощи первого метода было, например, определено, что средний наблюдатель может различить в спектре примерно 125 оттенков цветов и что для некоторых оттенков можно установить 200 ступеней по насыщенности. По второму методу можно представить себе закономерно построенное цветовое тело, в котором всевозможные цвета расположены так, что расстояния от данной точки в любом направлении психологически эквивалентны тому же расстоянию в любой другой области цветового тела, т. е. цвета на концах двух отрезков линий равной длины кажутся одинаково различными по цвету во всех областях цветового тела. Такие построения рассматриваются в литературе по колориметрии. К этому методу успешно приближается ряд материальных стандартных систем (атласы цветов), имеющих практическое значение.

Используя пороговый метод или равноступенные шкалы, можно исследовать многие цветовые ощущения и прийти к важным выводам о работе глаза и мозга при восприятии определенных физических световых раздражителей. Однако не следует забывать о том, что данные, полученные таким путем, существенно *отличны по своей природе* от аналогичных данных, получаемых при физических измерениях. В частности, они отличаются тем, что, например, такая физическая шкала, как шкала интенсивностей, является равноступенной в отношении определенной физической переменной, а шкала равных ступеней по ощущению не имеет такой определенности.

Рассмотрев эти три переменные, оценивающие восприятие в общем виде, можно теперь детально познакомиться с их индивидуальными особенностями. В частности, важно изучить, какими путями и в какой степени они связаны с физическими переменными, определяющими качество цвета. Как было показано ранее, прямая связь между светом, определяемым его физическими свойствами, и ощущением цвета отсутствует. Ниже приводится разъяснение этого положения и рассматриваются вытекающие из него следствия.

Светлота

Желательно рассмотреть сначала обычные понятия о светлоте, причем следует начать с того, что для этой переменной взаимосвязь между ощущением и вызывающим его стимулом менее определенна, чем для двух других переменных.

Обычно ощущение светлоты увеличивается с увеличением интенсивности света. Если единственным источником света в поле зрения наблюдателя является светящаяся точка и ее интенсивность количественно увеличивается или уменьшается без изменения спектрального состава излучения, то она будет казаться наблюдателю соответственно светлее или темнее при условии, что это изменение вообще заметно для глаза. Глаз, однако, значительно более чувствителен к *степени изменения* интенсивности, чем к ее абсолютной величине. Даже при тщательной визуальной оценке интенсивности света возможны ошибки в несколько сот раз по сравнению с действительным значением, причем величина ошибки зависит от условий, в которых предварительно находился глаз наблюдателя. При относительно быстром изменении интенсивности может быть замечено изменение ее абсолютной величины порядка нескольких процентов, а иногда даже и долей процента. Как уже указывалось, при оценке интенсивности постоянного света по производимому им ощущению возможны очень большие ошибки, так как сравнение делается по памяти с воспринимавшейся ранее светлотой. Точную величину ошибки в оценке светлоты установить обычно невозможно.

Несомненно, что должна существовать абсолютная шкала светлоты, однако она очень неопределенна по сравнению со шкалой интенсивностей, оцениваемых физическими методами. Это обстоятельство следует иметь в виду при рассмотрении изложенных ниже явлений световой адаптации, ибо было найдено, что глаз имеет тенденцию поддерживать постоянное ощущение светлоты при различных интенсивностях света. Если бы эта тенденция полностью превалировала, то все освещенные участки поля зрения того же качества казались бы одинаковой светлоты, однако в действительности так не бывает.

Глаз человека способен исключительно точно оценивать относительные яркости двух соприкасающихся полей, освещенных светом одного и того же качества. В то же время возможность оценки глазом абсолютной величины яркости весьма ограничена. Как указывалось ранее, глаз наилучшим образом работает тогда, когда он используется лишь как нулевой прибор. Он может устанавливать с высокой точностью равенство светлот и с достаточной точностью обнаруживать малые цветовые различия, но становится совершенно неточным при оценке абсолютных величин яркости.

Эти свойства присущи не только зрению, но в такой же степени и другим рецепторам человека. Решить, какой предмет легче или тяжелее, проще, чем оценить его абсолютный вес. Легче определить, какой предмет теплее или холоднее, чем определить абсолютные температуры этих предметов. Эти же соображения относятся и к громкости звука. Приведенные выше факты объясняются способностью организма приспосабливаться (адаптироваться) к окружающим его условиям и являются следствием одного из основных законов жизни. Прежде чем рассмотреть их детально применительно к зрению, следует сначала рассмотреть соотношения восприятия цветов при фиксированных условиях.

Рассмотрим сначала восприятие глазом двух бесцветных (ахроматических) поверхностей. Если эти поверхности различаются по светлоте, то более темная будет казаться серой. При низкой освещенности обе поверхности могут казаться серыми, но более темная из них будет казаться более темно-серой. Если освещенность достаточно велика (и в поле зрения нет более ярких поверхностей), то более яркая поверхность будет казаться белой, а темная — серой. Эти общие явления имеют место как для цветных, так и для ахроматических образцов. Всякий раз, когда наблюдаются две смежные поверхности, более темная из них будет казаться более серой, чем более светлая. Следовательно, можно отметить, что ощущение серого цвета возникает всегда в тех случаях, когда свет воспринимается как более темный по сравнению с другим. Кроме того, цвет воспринимается как серый обычно в тех случаях, когда абсолютные освещенности малы. При этом поверхность воспринимается как серая или как белая в зависимости от позиции наблюдателя.

Можно добавить, что описанные выше случаи являются единственными, при которых наблюдается серый цвет как для ахроматических, так и для цветных объектов. Ощущение серого указывает только на то, что светлота одного объекта меньше светлоты другого и не создается каким-либо особым качеством света. Кажущаяся «реальность» серых поверхностей почти полностью объясняется тем фактом, что в любой обычной ситуации имеется наблюдаемая поверхность с бóльшим коэффициентом отражения или хотя бы ясное представление, как эта поверхность должна выглядеть.

Серые поверхности

Прежде чем перейти к вопросу о серой поверхности, необходимо рассмотреть некоторые новые явления. Имеется существенная разница между *цветом поверхности* и *цветом излучения* того же качества. Это различие возникает потому, что поверхность всегда как-то локализована в пространстве. Однако объяснить его не так легко.

Свет может попасть в глаз наблюдателя либо непосредственно *от источника света*, либо *отразившись* от некоторой поверхности. Окружающие эту поверхность предметы могут быть освещены тем же светом или отличным от него. Таким образом, свет от данной сцены может попадать в глаз наблюдателя тремя способами: он может исходить непосредственно от источника света, или быть отраженным от предметов, освещенных основным источником света, или от предметов, освещенных некоторым местным источником света, не участвующим в общем освещении. С физической точки зрения эти три способа охватывают все возможные случаи [1]. С точки зрения психологии восприятия необходимо также принять во внимание наличие или отсутствие определенной фактуры отражающей свет поверхности. Фактура может быть определена как видимая неоднородность отражения света от поверхности, обычно обусловленная физическими свойствами поверхности. Она может изменяться от небольших неровностей, воспринимаемых просто как матировка поверхности, до нерегулярности структуры, как, например, у грубого текстиля, или обусловливается простыми изменениями коэффициента отражения. При любой фактуре видна сама поверхность и ее положение, причем свойства этой поверхности не ограничиваются простым отражением света.

При полном отсутствии фактуры поверхность непосредственно не видна, хотя о ее присутствии можно судить по наблюдению ее границ или на основании общих соображений. Рассмотрение фактуры позволяет установить пять возможных условий наблюдения предмета. Это число можно значительно увеличить, если учесть также и другие геометрические или физические условия, однако мы рассмотрим пять условий по попаданию света в глаз наблюдателя, так как они полностью определяют воспринимаемый цвет объекта, а именно:

1) непосредственно от источника света;

2) после отражения от поверхности, освещенной основным источником света и не имеющей явно выраженной фактуры;

3) после отражения от поверхности, освещенной основным источником света и имеющей явно выраженную фактуру;

4) от поверхности, освещенной отдельным источником света и не имеющей явно выраженной фактуры;

5) от поверхности, освещенной отдельным источником света и имеющей заметную фактуру.

Однако эти условия не охватывают прозрачные материалы с фактурой и без нее, так как они аналогичны вышеуказанным.

---

[1] Автор упускает из вида освещенность, вызываемую вторичными или многократными отражениями света между объектами наблюдаемой сцены.— *Прим. ред.*

Возможны три основных случая восприятия яркости излучения при белом фоне, окружающем наблюдаемый объект, базирующихся на приведенных выше пяти физических условиях восприятия.

1. **Наблюдаемый объект может казаться светлее, чем окружающий его белый фон.** Независимо от происхождения свет может восприниматься или непосредственно как источник света, или как поверхность с повышенной яркостью. Эти два способа восприятия могут иметь место при любом из пяти приведенных выше условий, но в общем случае действительные источники света и поверхности без фактуры будут иметь тенденцию восприниматься как источники света, а источники и предметы, имеющие фактуру,— как поверхности с повышенной яркостью. Белые поверхности с фактурой будут восприниматься просто как белые, ярко освещенные поверхности. Источники света с высокой относительной яркостью будут восприниматься в истинном виде независимо от их фактуры.

2. **Наблюдаемый объект может казаться примерно одинаковым по светлоте с окружающим белым фоном.** Все цвета независимо от их физических характеристик будут казаться или белыми, или не содержащими серого независимо от того, являются они источниками света или нет. Если известно, что данная поверхность действительно является источником света, то восприятие ее несколько изменяется, но в общем случае она по-прежнему будет восприниматься как освещенная поверхность, не содержащая серого. Наличие или отсутствие фактуры в этом случае мало влияет на восприятие.

3. **Наблюдаемый объект может казаться менее светлым, чем окружающий его белый фон.** В этом случае все цвета независимо от их физических характеристик будут казаться серыми или содержащими серый, причем количество воспринимаемого серого цвета определяется отношением яркостей белого фона и объекта.

Следует иметь в виду, что все эти случаи относятся исключительно к поверхностям, наблюдаемым одновременно с находящимися рядом белыми поверхностями. Суммируя все вышеизложенное, можно сказать, что любая поверхность, более яркая, чем освещенный белый фон, воспринимается как не содержащая серого и, следовательно, может восприниматься либо как источник света, либо как поверхность с повышенной освещенностью, в то время как любой объект меньшей яркости будет казаться содержащим серый цвет и будет казаться поверхностью независимо от его фактуры. При наличии фактуры даже при высокой яркости объект не воспринимается как источник света.

Белое, серое и черное

В предыдущем разделе мы разбирали восприятие белых, «яркобелых» и серых объектов. Здесь следует рассмотреть вопрос о восприятии белого, серого и черного. Этот случай может явиться интересным введением к вопросу о световой адаптации.

Восприятия белого, серого и черного характеризуются тем, что для них отсутствуют цветовой тон и насыщенность цвета в том значении, в каком они были определены ранее.

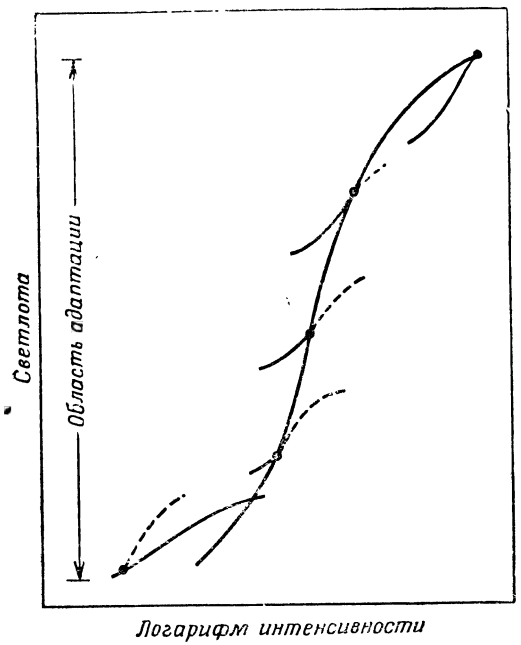
Любая попытка определить физические стимулы, обусловливающие зрительное восприятие, наталкивается на необходимость характеризовать не только сам стимул, но и его *окружение* (фон).

Любая неселективная поверхность, не являющаяся самой яркой в поле зрения, кажется серой, причем степень восприятия серого определяется относительной яркостью этой поверхности. Это же утверждение справедливо при оценке содержания серого в любом цвете.

Восприятие черного — явление значительно более сложное, чем восприятие серого или белого, причем при введении этого понятия мы впервые сталкиваемся с вопросом об уровне световой адаптации. Глаз как приемник излучения имеет тенденцию приспосабливаться к преобладающему уровню освещенности таким образом, что наблюдаемая область интенсивностей света всегда обусловливает примерно тот же диапазон воспринимаемой яркости (светлоты). Точные закономерности, определяющие уровень чувствительности глаза, в настоящее время еще не установлены, однако, как это следует из работ Хелсона [25] и Джадда [36], эти закономерности являются сложной функцией общего уровня освещенности и среднего значения коэффициентов отражения наблюдаемой сцены. Можно сказать, что в общем случае уровень чувствительности глаза определяется светом, входящим в зрачок глаза. Для данных условий освещения и наблюдения существует определенный «уровень адаптации» глаза. Он может меняться более чем в 100 000 раз, в то время как ощущение яркости (светлоты) меняется в значительно меньших пределах. При любом уровне адаптации существует такой уровень яркости, когда все поверхности независимо от их цветности будут восприниматься глазом как черные. Этот уровень яркости обычно называется «черной точкой». Величина этого уровня меняется с изменением уровня адаптации, и в настоящее время не существует простой закономерности, которая связывала бы его с уровнем адаптации или яркостью поверхности, оцениваемой как белая, хотя очевидно, что он зависит от этих обоих факторов.

Как указывалось в предыдущей главе, чувствительность глаза к различению яркостей (контрастная чувствительность глаза)

меняется с изменением уровня интенсивности света (яркости) и заметно зависит от формы поля зрения. Можно изобразить общую картину изменения чувствительности глаза при различных уровнях адаптации, основываясь на изложенных выше особенностях восприятий яркостей и их различий. Для этого необходимо определить число едва воспринимаемых или равноотстоящих друг от друга по



Ф и г. 8.2. Кривая зависимости различительной чувствительности глаза от уровня адаптации. [Marshall W. H., Talbot S. A., *Biological Symposia*, 7, 130.]

ощущению порогов яркости для всех уровней яркости при различных условиях наблюдения. Полученная таким путем зависимость показана на фиг. 8.2. (Аналогичная кривая приведена на фиг. 7.9.) Кривая *A* дает для каждого уровня яркости полное число порогов яркости, которое глаз различает от нулевой яркости до данного уровня при наблюдении малого поля, разделенного на две части на черном фоне. При этом условия адаптации задаются самим испытуемым полем и непрерывно меняются с изменением его яркости. Области различимых яркостей для случаев, когда сравниваемые поля окружены значительно бо́льшим полем,

яркость которого поддерживается на определенном уровне, отмеченном на фиг. 8.2 точками, изображены небольшими отрезками кривых, пересекающими основную кривую. Как следует из фиг. 8.2, нисходящие ветви этих коротких кривых, изображенные сплошными отрезками, значительно более ограничены, чем основная кривая. Для яркостей, превосходящих яркость фона, эти кривые (изображенные пунктиром) имеют другой наклон, чем для яркостей, меньших яркости фона. Эта разница обусловлена тем, что в этом случае уровень адаптации зависит не только от яркости фона, но и от превышающей ее яркости наблюдаемого центрального поля.

Таким образом, глаз является прибором с переменной чувствительностью. Реакции глаза на определенные стимулы изменяются с изменением его чувствительности. Этот эффект хорошо известен и обычен при наблюдении всего поля зрения (всей сцены) полностью. Хорошим примером может служить высокая видимая яркость ламп накаливания ночью по сравнению с кажущимся слабым накалом при сслнечном свете.

Световая адаптация

Те же явления имеют место и при наблюдении одинаково освещенной сцены при обычных условиях зрения. Глаз меняет свою чувствительность не только при изменении величины общей освещенности, но и в зависимости от конкретно наблюдаемого объекта, причем существенную роль играет также предшествующее по времени восприятие. Объяснение основных фактов из области световой адаптации приведено в работах Райта [86] (Англия) и Схоутена [73] (Голландия). Явления световой адаптации вкратце можно изложить следующим образом

При наблюдении глазом освещенной поверхности чувствительность его сетчатки в области изображения очень быстро снижается. Время, необходимое для такой адаптации (порядка 0,2 *сек*), совпадает со временем, необходимым для восприятия яркости вообще. (Имеются факты, свидетельствующие, что снижение чувствительности может даже являться *причиной* восприятия.)

Снижение чувствительности в результате адаптации было измерено способом, впервые изложенным Райтом [86]. Измерительная установка была построена так, что поле зрения было разделено на две части, каждая из которых наблюдалась соответственно только одним глазом, причем была предусмотрена возможность быстрой регулировки яркости каждой части поля. Одна из половин поля зрения могла легко на требуемый период времени заменяться полем адаптации большей яркости. Процесс измерения заключался в том, что наблюдатель сравнивал яркость двух половин поля

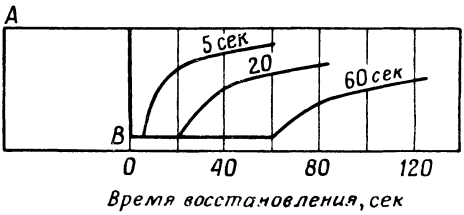
зрения, одна из которых предварительно была заменена полем адаптации. Было показано, что если две половины поля зрения совпадают по светлоте для неадаптированного глаза, то после адаптации они кажутся различными по светлоте. Для адаптированного глаза, чтобы получить светлотное равенство, необходима большая яркость, чем для неадаптированного. Необходимое увеличение яркости можно было определить путем быстрого изменения яркости до получения равенства восприятий. Было также установлено, что действие адаптированного поля постепенно спадает по определенному закону и равенство светлот обоих полей восстанавливается. В результате исследования этого явления может быть определена скорость, с которой восстанавливается чувствительность глаза после адаптации.

Хотя детальный анализ исследований по адаптации довольно сложен, их результаты достаточно ясны. Они показывают, что в процессе воздействия света на глаз его чувствительность почти мгновенно падает. Величина этого снижения зависит от интенсивности света и состояния адаптации глаза перед действием света. Глаз, таким образом, почти мгновенно под действием более яркого источника света принимает новое состояние адаптации, новый уровень которой зависит от старого. Эта зависимость связана с процессом восстановления чувствительности после адаптации. Скорость восстановления чувствительности сильно меняется с изменением *времени* экспозиции, как показано на фиг. 8.3.

Если время экспозиции мало, то чувствительность глаза восстанавливается почти мгновенно. По мере увеличения времени экспозиции процесс восстановления все более и более замедляется и, если время экспозиции составляет около 1 *мин*, длится несколько минут.

Изложенные выше факты позволяют установить следующую картину процесса адаптации при нормальном зрении. При осмотре глазом наблюдаемой сцены (обычно скачками) через сетчатку проходят изображения одного объекта за другим. При каждом фиксировании зрения на отдельном участке объекта чувствительность отдельных участков сетчатки глаза понижается или повышается до нового уровня. Таким образом, любая поверхность соответственно воспринимается в зависимости от чувствительности и яркости поверхности, воздействовавшей на глаз ранее. Однако имеются два фактора, влияющие на это явление таким образом, что в общем случае изменения чувствительности не столь велики: во-первых, диапазон изменения яркостей в наблюдаемых глазом сценах обычно мал по сравнению с предельно возможным и, во-вторых, глаз редко останавливается на каком-либо объекте сколько-нибудь значительное время. Из первого фактора следует, что глаз получает длительные экспозиции лишь к интенсивностям, лежащим

в относительно узких пределах. Вследствие этого устанавливается уровень адаптации глаза, соответствующий некоторому среднему значению яркости. Кратковременные экспозиции отдельных поверхностей вызывают сдвиги чувствительности относительно этого среднего уровня. Время возвращения чувствительности к



Ф и г. 8.3. Кривая, показывающая восстановление чувствительности глаза, после адаптации к более интенсивному освещению в течение различных периодов времени.

Уровень *A* соответствует чувствительности при темновой адаптации; уровень *B* соответствует чувствительности после наблюдения источника света высокой интенсивности.

среднему значению зависит от времени наблюдения каждой поверхности и в связи с этим меняется от очень малого, соответствующего времени мигания (эта функция глазного века, позволяющая часто получать темную паузу восприятия, столь же важна, как и смачивание глазного яблока), до весьма значительного периода, достаточного для того, чтобы сделать заметной разницу в восприятии объектов, наблюдаемых последовательно.

Пользуясь той же методикой, исследователи нашли, что освещение одной части сетчатки вызывает аналогичные, хотя и значительно меньшие изменения в областях сетчатки, соседних с освещаемой. Таким образом, одновременно имеют место три типа адаптации. Во-первых, медленное изменение уровня адаптации, называемое общей адаптацией, при общем длительном воздействии света. Во-вторых, местная адаптация при кратковременной локальной экспозиции, возвращение от которой к общему уровню более или менее длительное. И, в-третьих, побочная (индуктивная) адаптация, которая имеет место вследствие действия этих местных адаптаций на соседние участки сетчатки.

Всем известны и повседневно наблюдаются явления, обусловленные этими тремя типами световой адаптации. Общая адаптация — общее изменение чувствительности глаза — имеет место тогда, когда мы переходим из освещенного помещения в темное и должны ждать, пока увидим что-либо, или, наоборот, при болезненном

для глаз переходе из темного помещения в помещение, освещенное солнцем. Это явление вызывает внезапное потемнение наблюдаемого из окон пейзажа в сумерки, когда впервые включается свет. При этом явлении явно демонстрируется практическая мгновенность перехода к новому состоянию адаптации. Местная адаптация проявляет себя как хорошо известные «последовательные образы» и эффекты «последовательного контраста». Побочная адаптация проявляется как явление «одновременного контраста» и как «блесткость».

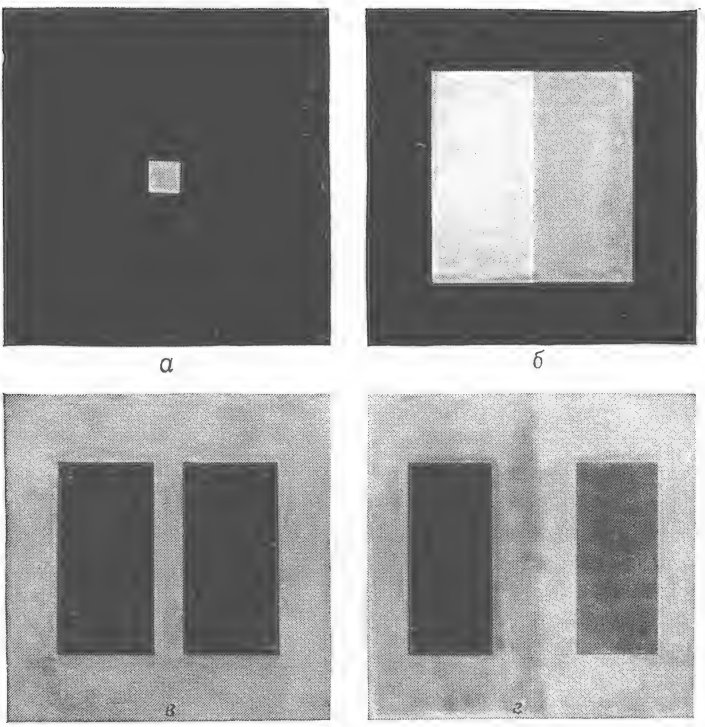
Для того чтобы лучше описать влияние этих эффектов на ощущение светлоты данной поверхности, рассмотрим их применительно к четырем различным формам полей зрения, изображенным на фиг. 8.4.

а) Глаз адаптируется к наблюдаемой светлой поверхности (фиг. 8.4, *а*). В связи с этим отсутствует восприятие серого, за исключением случаев очень низкой освещенности или наличия фактуры, существенно изменяющейся по яркости и могущей служить в связи с этим внешним источником сравнения белого цвета. При повышении освещенности ощущение светлоты возрастает, но значительно медленнее, чем изменение интенсивности.

б) Возможны разные случаи наблюдения двух смежных полей, различающихся по яркости, однако почти каждый из них подчеркивает разницу между ними (фиг. 8.4, *б*). Если глаз сначала смотрит на более яркую половину поля зрения, его чувствительность понижается и при переводе взгляда на вторую половину поля зрения последняя кажется более темной. Если же смотреть на более темную половину, то, наоборот, чувствительность глаза возрастает и более яркая половина кажется еще светлее. Наблюдение черного фона в общем случае позволяет достигнуть еще более высокого уровня адаптации, что в свою очередь снова помогает заметить разницу в светлоте наблюдаемых полей. В случае, если поля имеют очень большую яркость, она может вызвать явление слепимости, что приведет к уменьшению разницы в светлоте сравниваемых полей. Фиксированное наблюдение некоторой точки поля зрения без миганий может привести к полной местной адаптации сетчатки и значительно уменьшить чувствительность.

в) В случае трехкомпонентного поля, изображенного на фиг. 8.4, *в*, внешний фон мало влияет на восприятие, если только он не превосходит по площади и яркости центральное поле. Однако в этом случае фон обусловливает как общую, так и местную адаптацию, причем степень адаптации зависит от движения глаз при наблюдении. Этот уровень адаптации затем определяет чувствительность глаза при наблюдении центральных полей. В общем случае, если центральные поля значительно темнее фона, любая разница яркостей должна быть достаточно велика, чтобы она была замет-

ной. Чувствительность глаза к восприятию различия яркостей обоих полей возрастает с приближением яркости фона к яркости поля. Когда яркости полей значительно превосходят яркость фона, он перестает играть всякую роль в адаптации глаза и внутренние поля



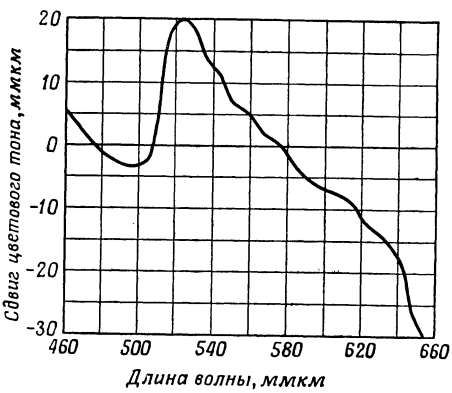
Ф и г. 8.4. Различные формы полей зрения.

а — единичное поле при черном фоне; центральное поле кажется светлее, чем оно воспринималось бы при отсутствии фона; *б* — два смежных поля на черном фоне; глаз очень чувствителен к различию в яркостях; *в* — два разнесенных поля; благодаря светлому фону и темным полям глаз относительно малочувствителен к различию яркостей; *г* — два разнесенных поля с фонами различной яркости; темные поля имеют одинаковые яркости, однако правое кажется темнее по контрасту с фоном.

воспринимаются так, как если бы фона совсем не было. Максимальная чувствительность достигается в том случае, когда яркость фона является средней между яркостями двух внутренних полей, а также когда фон полностью отсутствует.

г) Более сложные соотношения имеют место в случае четырехкомпонентного поля (фиг. 8.4, *г*). Такое поле исследовали Хесс и

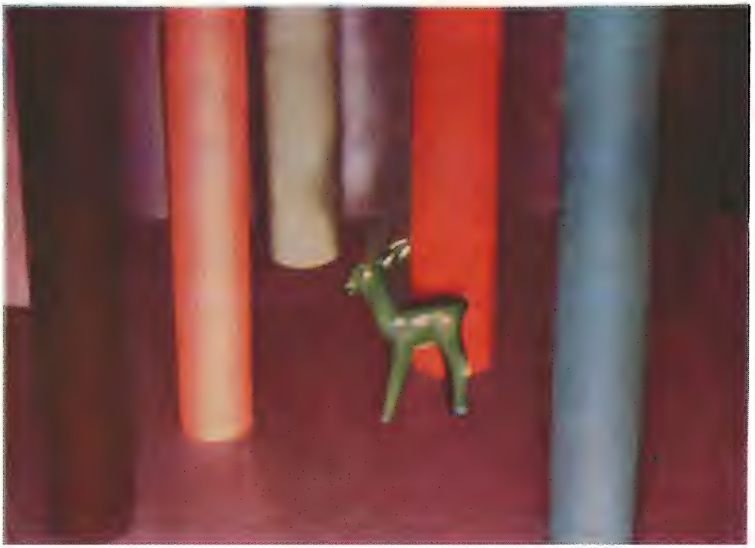
Претори [30] в 1894 г. (см. гл. X). Они пытались определить соотношение яркостей центральных полей, при которых эти поля совпадают по светлоте, при различных яркостях фонов, превышающих по яркости поля сравнения. Они нашли, что в том случае, когда глаз наблюдателя фиксирует центр вертикальной линии раздела, соотношение имеет сравнительно простую форму. Короче говоря, если получено равенство светлот центральных прямоугольников при некоторых яркостях фона, это равенство сохранится, если освещенность центральных полей и фонов увеличивать таким образом, чтобы соотношение освещенностей сохранилось. Требуемое отношение яркостей центральных полей и фона зависит от условий наблюдения. Светлота любого из центральных полей почти полностью определяется яркостью окружающего фона главным образом вследствие того, что в этом случае из-за фиксированного положения глаз наблюдателя имеет место явление побочной адаптации или последовательного контраста.



Ф и г. 8.5. График зависимости цветового тона от интенсивности, в котором ординаты дают изменение длины волны монохроматического излучения, необходимое, чтобы получить излучение того же цветового тона при понижении интенсивности от 1000 до 100 фотонов. (Фотон — единица освещенности сетчатки, соответствующая яркости в 1 *св* с 1 $м^2$ при площади зрачка, равной 1 $мм^2$.— *Ред.*) [P u r d y D. M., *The Am. J. of Psychology*, **43**, 548 (1931).]

На этом мы заканчиваем рассмотрение вопроса о светлоте, однако к нему мы будем возвращаться еще много раз в последующих главах книги. Было установлено, что явления, аналогичные описанным, возникают и в отношении ощущений цветового тона и насыщенности, хотя эти эффекты не так хорошо известны и их не так легко заметить. Более того, в связи с трудностями наблюдения и измерений различия в цветовом тоне и насыщенности в этой области проведено значительно меньше исследований и данные этих исследований менее доступны.

Мы можем начать наш обзор понятий цветового тона и насыщенности несколькими простыми качественными утверждениями и продолжить его рассмотрением рядом примеров из обычной практики. Во-первых, цвета различного цветового тона, но сравнимых светлот, помещенные рядом, воздействуют на восприятие каждого из них таким образом, что различие в цветовых тонах увеличивается. Это же положение имеет место в отношении различия в насыщенности, причем в этом случае возможно также значительное



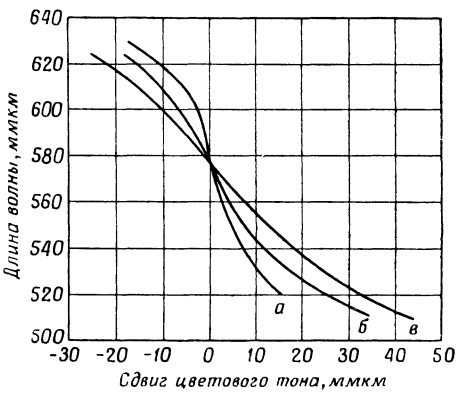
Влияние контрастности освещения на восприятие глубины. Верхняя композиция освещена спереди диффузным светом. Идентичная композиция при недиффузном высококонтрастном освещении сбоку, приведенная на нижнем рисунке, дает значительно большее восприятие глубины.

изменение и цветового тона. Кроме того, цветовой тон и насыщенность несколько зависят от интенсивности света и состояния адаптации глаза наблюдателя.

Зависимость цветового тона и насыщенности от яркости излучения

Зависимость ощущения цветового тона от яркости для чистых монохроматических излучений была изучена Пьюрди. Результаты его исследований при изменении яркости в 10 раз приведены на фиг. 8.5. Приведенная кривая показывает на сколько миллимикрон и в какую сторону должна изменяться длина волны поля сравнения, чтобы излучение по цветовому тону совпадало с излучением той же длины волны, но меньшей яркости.

На фиг. 8.6 показаны аналогичные, но менее убедительные данные [1] по действию насыщенности на цветовой тон для ограниченной области спектра. Он изучал примерно таким же образом влияние интенсивности излучения на цветовой тон, но в значительно бо́льших пределах изменения интенсивности и пришел к заключению, что все цвета имеют тенденцию при больших интенсивностях сдвигаться в сторону синих и желтых и при малых интенсивностях — в направлении красных или зеленых, что не противоречит данным [1].



Ф и г. 8.6. Кривые, показывающие изменение цветового тона при добавлении белого света к монохроматическим излучениям.

Кривая *а* соответствует 43% белого; *б* — 21,5%; *в* — 15%. Для излучений с длинами волн, бо́льшими 577 *ммкм*, цветовой тон при добавлении белого становится менее красным, а для излучений меньших длин волн цветовой тон смещается к красному концу спектра. (A b n e y W. D e w., Research in Coln our Vision and the Trichromatic Theory, Lnd., 1913, p. 260.)

Цветовая адаптация

Широко известно действие цветов различного цветового тона, помещенных рядом друг с другом. Этот эффект, обычно называемый одновременно цветовым контрастом, был исследован в текущем столетии во Франции [12]. Было установлено, что глаз при

одновременном контрасте имеет тенденцию вычитать один цвет из другого и усиливать различие между ними. Это явление становится более ясным при рассмотрении цветового графика, причем эффект обычно сводится к увеличению различия в цветовом тоне. Таким образом, оранжевый и желтый цвета, помещенные рядом, выглядят как красно-оранжевый и зеленовато-желтый. Другими словами, цвета в этих условиях приближаются к дополнительным, т.е. к цветам, дающим при аддитивном смешении белый цвет. Если поместить рядом два цвета одного и того же цветового тона, но разной насыщенности, то цвет с меньшей насыщенностью будет казаться дополнительным. Если оба цвета имеют в среднем высокую насыщенность, то действие контраста сказывается лишь в подчеркивании различия в насыщенности. Если насыщенность одного из цветов достаточно мала, то он может казаться явно дополнительным по цвету к первому.

Наиболее непосредственная демонстрация одновременного цветового контраста создается при наблюдении на относительно большой белой поверхности теней от двух источников цветного света. В этом случае каждая тень освещена только одним из источников света, а фон — обоими. Такие тени *всегда* кажутся приблизительно дополнительными *независимо* от цвета источников света, хотя вследствие близости их цветовых тонов насыщенность цвета будет *невелика*. Этот эффект, обнаруженный очень давно, можно легко повторить даже в домашних условиях. Единственное условие заключается в том, что источники света должны быть различного цвета. Наиболее удовлетворительные результаты получаются в том случае, когда источники создают примерно одинаковую освещенность на экране и когда они заметно отличаются по цвету. Это явление имеет место и тогда, когда данные условия не соблюдаются. Однако при близости цветовых тонов источников света насыщенность цвета в тенях мала, а при большой разнице в освещенности цвета становятся незаметными (тусклыми).

Все описанные выше эффекты связаны с явлением цветовой адаптации, механизм которой был исследован Райтом [86] и Шаутеном [73]. Цветовое зрение человека в упрощенном виде можно объяснить работой трех приемников излучения с тремя довольно широкими кривыми спектральной чувствительности, из которых один чувствителен в синей и сине-зеленой частях спектра, второй — в зеленой, а третий — в красной и несколько в крайней синей частях спектра (фиолетовой). Каждый из этих приемников работает независимо в соответствии с особенностями, изложенными при рассмотрении вопроса о восприятии яркостей. Реальное существование этих цветовоспринимающих приемников в настоящее время не доказано. Однако для объяснения явлений цветового зрения необходимо предположить существование четырех приемников излу-

чения[1]. Четвертый приемник, воспринимающий яркость излучения, имеет кривую спектральной чувствительности, приведенную в гл. II и обычно называемую кривой видности. Этот приемник заметно не изменяет свою кривую спектральной чувствительности при адаптации и поэтому должен рассматриваться как независимый от трех других. Конечно, можно представить себе, что он является одним из трех цветовоспринимающих приемников и одновременно обеспечивает цветовые ощущения, однако эту гипотезу представить себе труднее, чем гипотезу четырех приемников. Эта гипотеза необязательно правильна, однако при помощи ее можно предсказать ряд наблюдаемых явлений цветового зрения и удовлетворительно объяснить все явления, связанные с цветовой адаптацией и смешением цветов.

Рассмотрим теперь на основе этой гипотезы ряд основных явлений, изложенных в начале главы.

Предположим, что все приемники имеют одинаковую чувствительность при адаптации к излучению некоторого спектрального состава и интенсивности, близкому к дневному свету. Излучение такого спектрального состава и яркости кажется всегда белым, а излучение другого относительного спектрального состава, но той же яркости кажется цветным.

Можно считать, что при действии на глаз цветного излучения чувствительность приемников уменьшается примерно пропорционально возбуждению каждого из них[2]. Таким образом, при действии на глаз зеленого излучения «зеленый» приемник и в меньшей степени «красный» и «синий» снижают свою чувствительность. Продолжительность этого снижения чувствительности определяется теми же закономерностями, что и при восприятии яркости, т. е. чем выше интенсивность и чем длительнее время наблюдения, тем медленнее восстанавливается чувствительность. В то время, когда действие процесса адаптации еще продолжается, глаз имеет пониженную чувствительность зеленого приемника. Неселективное излучение малой интенсивности в этом случае будет восприниматься как розовое, а желтое излучение — как оранжевое и т. д. Это явление, конечно, имеет

---

[1] Существование специального (четвертого) приемника, создающего ощущение светлоты, кривая чувствительности которого совпадает с кривой видности, не является в настоящее время общепризнанным. Сложный характер зависимости ощущения светлоты для излучений различной цветности от яркости противоречит этой гипотезе. Более правильно рассматривать ощущение светлоты как сложную функцию реакций трех основных приемников глаза.— *Прим. ред.*

[2] Предположение автора о наличии линейной связи между уменьшением чувствительности приемников при адаптации и величинами их реакций является весьма грубым приближением к наблюдающейся в действительности весьма сложной закономерности. В связи с этим приводимое автором ниже рассмотрение процесса цветовой адаптации имеет также лишь качественный характер.— *Прим. ред.*

место для всех трех форм адаптации: общей, местной и побочной. Адаптация к зеленому цвету приводит к тому, что излучения, воспринимаемые как белые, будут казаться зелеными при дневной адаптации. К таким поверхностям, воспринимаемым как белые, относятся, например, неселективные поверхности, освещенные зеленым светом. Это положение справедливо при освещении поверхностей светом малой насыщенности, в то время как при освещении насыщенным цветным светом имеют место исключения из этого правила (эффект Хелсона—Джадда, см. гл. XI).

Наблюдение зеленого света каким-либо участком сетчатки приводит к локальной адаптации, т. е. уменьшению чувствительности зеленого приемника по сравнению с другими в определенном участке сетчатки. При наблюдении этим участком сетчатки неселективной серой поверхности будет заметна розовая точка, вызванная этой местной адаптацией, являющаяся последовательным образом наблюдавшейся ранее зеленой поверхности.

Яркая цветная точка воспринимается не только тем участком сетчатки, на котором создается ее изображение, но и вызывает понижение чувствительности соседних участков. Следовательно, при наблюдении зеленого образца, помещенного рядом с сине-зеленым, вследствие адаптации к зеленому цвету сине-зеленый образец будет казаться более синим. В этом случае мы имеем дело с адаптацией, вызванной явлением одновременного цветового контраста. Влияние этой адаптации является, конечно, взаимным, вследствие чего зеленый цвет из-за адаптации глаза к синему излучению будет казаться более насыщенным.

В свете этих явлений полезно рассмотреть также особенности образования цветных теней. Предположим, что мы имеем два источника света, освещающих большой белый экран и некоторый объект, расположенный таким образом, что от него на экране образуются две четкие тени от каждого источника света. Предположим далее, что цвет одного источника насыщенный желтый, а другого насыщенный красный. Вся поверхность экрана, за исключением области теней, будет в этом случае оранжевого цвета, образованного смешением желтого и красного излучений. Одна тень будет освещена только желтым светом, а другая— только красным.

Желтый свет примерно одинаково воздействует на «красный» и «зеленый» приемники, понижая их чувствительность, но практически совершенно не воздействует на «синий» приемник. В свою очередь красное излучение воздействует на «красный» приемник, не изменяя чувствительности «зеленого» и «синего». Таким образом, когда мы наблюдаем освещенный экран, чувствительность «синего» приемника снижается очень незначительно, «зеленого» — несколько больше, а «красного» — в значительной степени. Рассмотрим, каково будет в этом случае восприятие адаптированным глазом

излучения желтого цвета. Так как «синий» приемник практически не возбуждается, то его чувствительность будет высокой и будет приближаться к ее значению для совершенно темного помещения. Следовательно, эта чувствительность может превышать нормальную, соответствующую условиям дневного зрения, в сотни раз. Так как практически не существует физических источников света, полностью лишенных синего излучения, а «синий» приемник имеет некоторую чувствительность к излучениям большей длины волны, чем синие, то это повышение чувствительности будет продолжаться до тех пор, пока он начнет в некоторой степени чувствовать желтое и красное излучение. В то же время, как мы уже установили, чувствительность «зеленого» приемника несколько снизится, а «красного» будет значительно понижена. Поэтому глаз будет воспринимать желтое излучение как *сине-зеленое*, и тень, освещенная этим излучением, будет выглядеть сине-зеленой. С другой стороны, тень, освещенная красным излучением, воздействует исключительно на «красный» приемник при очень малом влиянии на синий, и, следовательно, она будет выглядеть темно-красной с небольшой примесью синего. Тени, которые объективно должны иметь желтый и красный цвета, кажутся наблюдателю сине-зелеными и красно-синими, т. е. имеющими дополнительные цвета. Если рассматривать таким образом любые пары цветов, результат будет получаться всегда принципиально одинаковым. Цвета всегда будут казаться дополнительными по цветовому тону[1]. Если разница в степени возбуждения отдельных приемников будет невелика, то цвета теней будут малонасыщенными.

Общая цветовая адаптация

Описанные выше явления не очень важны с точки зрения нормального цветового зрения, хотя во многих специальных случаях одновременный цветовой контраст является важной проблемой. Однако даже при обычных условиях зрения общая адаптация, связанная с источником света, имеет весьма важное значение. Рассмотрим влияние адаптации сначала для источников, не сильно отличающихся по цвету от дневного света, а затем и для источников с сильно насыщенным цветом излучения. Хотя последний случай можно рассматривать как предельный случай первого, рассмотрение вопросов цветного освещения делает ясным некоторые явления, которые в других случаях незаметны и поэтому должны быть рассмотрены отдельно.

[1] Цвета, наблюдаемые по контрасту, не точно совпадают с дополнительными цветами. Совпадение контрастных и дополнительных цветов имеет место лишь для некоторых цветовых тонов. См. [4] в списке дополнительной литературы.— *Прим. ред.*

При наблюдении в течение долгого времени некоторой сцены, освещенной, например, обычными лампами накаливания, средний цвет излучения, попадающего в глаз, примерно эквивалентен цвету излучения самого источника света, так как глаз усредняет цветовые ощущения, получаемые им от различных объектов, находящихся в поле зрения. Так как излучение такого источника, довольно слабое в синей части спектра, постепенно увеличивается в зеленой и особенно в красной частях спектра, то в этом случае глаз наиболее чувствителен к синему излучению, менее чувствителен к зеленому и почти не чувствителен к красному излучению. Поэтому при длительном наблюдении время восстановления нормальной адаптации велико и все предметы наблюдаются глазом, адаптированным, как описано выше. Следовательно, распределение чувствительности между приемниками глаза, грубо говоря, противоположно спектральному распределению энергии источника света. Таким образом, неселективная поверхность, освещенная этим источником света, будет казаться белой, так как в мозг поступают те же сигналы, что и при дневном свете. Более того, все нормальные цвета будут иметь тенденцию восприниматься так же, как и при дневном свете, так как глаз, меняя соответствующим образом свою чувствительность, компенсирует недостатки источника света.

Психологи называют это явление константностью цвета, так как благодаря этому явлению цвет объектов поддерживается примерно постоянным независимо от спектрального состава излучения источника света. Это свойство глаза имеет очень большое значение в повседневной жизни; благодаря ему мы рассматриваем цвет как *свойство наблюдаемого объекта*, в то время как при фиксированной чувствительности приемников он бы изменялся в широких пределах. Так, например, белая бумага, освещенная источником искусственного света, казалась бы наблюдателю очень желтой, если бы не было явления цветовой адаптации.

Вследствие важного значения этого явления и так как оно не полностью реализуется для среднего наблюдателя, кажется важным рассмотреть его более детально и показать, в какой степени в действительности имеет место постоянство цвета объектов. Перечислим и рассмотрим по порядку четыре основных случая.

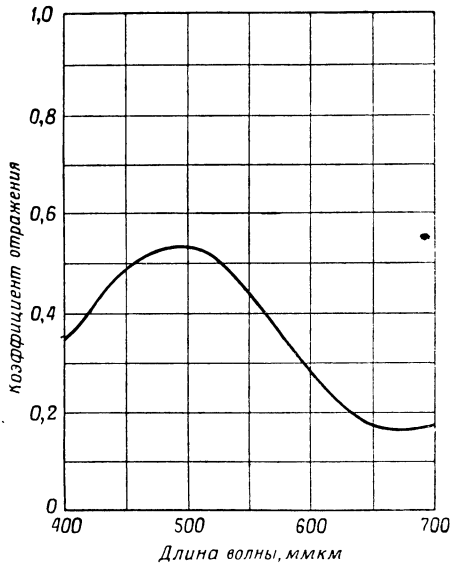
1. Объект отражает свет всех длин волн видимого спектра, и цвет его обусловлен небольшими отклонениями спектральных коэффициентов отражения от среднего значения.

2. Объект имеет высокий коэффициент отражения в одной области спектра и малый коэффициент отражения во всех других.

3. Два излучения различаются по спектральному распределению энергии, но совпадают по цвету при дневных условиях наблюдения.

4. Два цветных объекта различной относительной яркости наблюдаются глазом, адаптированным к различным источникам света.

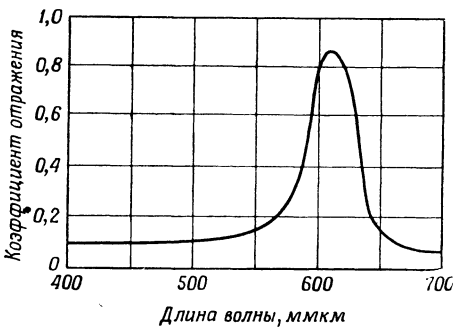
Случай 1. Каждый цветовой приемник глаза воспринимает излучение, к которому он чувствителен. Для определения общего действия данного излучения на приемник подсчитывают произведения энергии воспринимаемого глазом излучения на спектральную чувствительность приемника для каждой длины волны и затем суммируют эти произведения для всей видимой области спектра. Предположим, что рассматривается бумага синего цвета (при дневном освещении), *спектральная кривая* отражения которой приведена на фиг. 8.7. Поверхность этой бумаги отражает свет всех длин волн видимого спектра с преимущественным отражением в синей части. Предположим, что в этом случае при дневном освещении реакция «зеленого» приемника вдвое меньше, чем «синего», а «красного» вдвое меньше, чем «зеленого». Свет от лампы накаливания по сравнению с естественным дневным светом содержит меньше синего и зеленого излучения, чем красного. Предположим, что в нем содержится $^1/_5$ энергии в синей части спектра и $^1/_3$ энергии в зеленой по сравнению с энергией красной части, в то время как для дневного света энергии всех этих областей одинаковы. При полной адаптации глаза к свету лампы накаливания он в 5 раз более чувствителен к синему свету и в 3 раза более чувствителен к зеленому, чем к красному свету по сравнению с условиями дневной адаптации. Соответственно синяя бумага, освещенная лампой накаливания, будет продолжать восприниматься как синяя, так как спектр излучения источника света будет как бы исправлен за счет изменения чувствительности глаза наблюдателя. Реакция «синего» приемника будет по-прежнему больше в 4 раза, а «зеленого» — в 2 раза, чем реакция «красного». Таким образом, голубая бумага, имеющая непрерывный спектр



Ф и г. 8.7. Кривая отражения синей бумаги.

отражения с постепенным изменением величин коэффициентов отражения, будет иметь для наблюдателя тот же цветовой тон, что и при естественном дневном освещении.

Случай 2. Предположим, что вместо голубого образца мы имеем поверхность, отражающую только узкую область спектра. Спектральная кривая коэффициентов отражения этого образца показана на фиг. 8.8. При дневном свете эта поверхность будет возбуждать примерно одинаково «зеленый» и «красный» приемники, и поэтому наблюдатель будет ее видеть как желтую. Предположим, что эта поверхность, как и в первом случае, освещается лампой накаливания. Поскольку все отраженное от образца излучение сосредоточено в узкой области спектра, то спектральный состав отраженного излучения при переходе к освещению, плавно изменяющемуся по спектру, почти не меняется. При отражении образцом света лишь одной длины волны изменение будет полностью отсутствовать. В то же время в результате адаптации глаза к новому источнику света соотношение чувствительности его приемников изменится. Так как в излучении ламп накаливания содержится лишь $^1/_3$ энергии в зеленой части спектра по сравнению с красной, отношение чувствительности «зеленого» приемника к «красному» составит 3:1. Учитывая, что спектральный состав излучения, отраженного от образца, практически не изменится, реакция «зеленого» приемника на отраженное излучение будет в 3 раза больше, чем «красного», и цвет образца вместо желтого будет казаться наблюдателю желто-зеленым.



Фиг. 8.8. Кривая отражения желтой поверхности.

Практически такие предельные случаи, как рассмотренный выше, возникают весьма редко. Так, например, при наблюдении монохроматического желтого цвета на фоне, освещенном лампой накаливания, он будет восприниматься как зеленый. Таким образом, разница в восприятии в этом случае связана не с изменением спектрального состава излучения, отраженного образцом, а с изменением состояния адаптации глаза наблюдателя.

Случай 3. Предположим, что два излучения с различным спектральным распределением энергии подобраны таким образом, что они совпадают по цвету для глаза, адаптированного к дневному свету. Как было показано выше, для этого необходимо, чтобы

реакции всех приемников глаза наблюдателя были бы для обоих излучений одинаковы. Более точно это означает, что эффективные количества света, оцененные каждым из приемников, те же самые во всей области, к которой приемник чувствителен. Математически это означает, что если для каждой длины волны перемножить значение спектральной интенсивности источника на чувствительность данного приемника, то суммы этих произведений для обоих источников будут равны для всех трех приемников.

Предположим теперь, что глаз наблюдателя адаптирован к свету некоторого источника, отличающемуся по цвету от естественного дневного света. В этом случае, как мы видели, абсолютные чувствительности каждого из приемников глаза изменяются, причем форма спектральных кривых чувствительности каждого приемника остается неизменной. То же самое количество энергии в любой длине волны может вызвать теперь бóльшую или меньшую реакцию данного приемника, но если этот приемник до адаптации для данной длины волны имел чувствительность в 2 раза большую, чем для другой, то такое же соотношение чувствительности сохранится и после адаптации. Другими словами, относительное спектральное *распределение* чувствительности приемников не изменится, а изменится лишь абсолютная величина реакции.

Если последовательно применить изложенный выше принцип, станет ясным, что для обоих излучений, совпадающих по цвету независимо от изменения абсолютной чувствительности приемников при условии сохранения формы кривых спектральной чувствительности, реакции приемников останутся равными. В связи с этим равенство по цвету сохранится при любых условиях адаптации, хотя сам кажущийся цвет обоих излучений может значительно измениться. Описанное выше сохранение равенства по цвету является важным экспериментальным фактом. Изменение же цвета самих излучений при изменении условий адаптации объясняется, конечно, изменением соотношений реакций цветовоспринимающих приемников глаза.

Приведенное выше рассмотрение применимо только к паре излучений, кривые спектрального распределения энергии которых не изменяются с изменением условий освещения, к которому адаптируется глаз. Пара отражающих свет поверхностей, совпадающих по цвету в условиях дневного освещения, изменит распределение энергии отраженного излучения при изменении спектра источника света. Несмотря на то что глаз будет стараться исправить это изменение, цветовое равенство в общем случае не сохранится по причинам, разобранным нами выше (случай 2).

Случай 4. В изложенных выше трех случаях действия адаптации мы большей частью ограничивались рассмотрением цветовоспринимающих приемников глаза, хотя в третьем случае было указано,

что равенство по светлоте также сохраняется при изменении условий адаптации. Совершенно другая ситуация возникает при рассмотрении вопроса об относительных яркостях отражающих свет цветных объектов при различных источниках освещения. Предположим, что красная и зеленая поверхности при дневном освещении имеют одинаковую яркость. Относительные яркости этих поверхностей могут быть рассчитаны путем умножения для каждой длины волны величины спектральной плотности энергии излучения источника на соответствующие значения спектральных коэффициентов отражения поверхности и на кривую видности глаза и суммирования этих произведений для всей области видимого спектра. В результате такого расчета для двух поверхностей получают два числа, определяющих соотношение их яркостей при данном источнике. Важно отметить, что в данном случае мы говорим о яркостях, а не о светлоте, так как в результате расчета получают лишь психофизические величины, а не психологические.

При изменении источника освещения, например при переходе к лампе накаливания, получаются новые расчетные значения яркостей, соотношение которых изменится, если спектральные кривые отражения образцов разные. При этом компенсирующее влияние адаптации не будет учитываться. Насколько известно в настоящее время, кривая видности глаза в этом случае заметно не изменяется, а изменяется лишь абсолютная чувствительность глаза при изменении уровня освещенности.

В соответствии с этим равенства по яркости отражающих или пропускающих свет объектов (в том числе и в случае субтрактивных смесей) при изменении условий освещения не сохраняются, так как имеющие место изменения спектрального состава отражающего излучения не компенсируются изменением адаптации. Так, зеленые объекты кажутся обычно темнее по сравнению с красными при искусственном освещении, чем при дневном, так как лампы накаливания имеют относительно меньше излучения в зеленой части спектра, чем в красной.

Подводя итог изложенному, можно сказать, что, хотя отсутствует простое соответствие между физическим стимулом и вызываемым им цветовым ощущением, при учете явлений цветовой адаптации описанным выше методом между ними может быть установлена достаточно прямая связь. Существует вполне определенная зависимость между стимулами, дающими совпадающие цветовые ощущения, причем те же равенства сохраняются независимо от состояния адаптации глаза. При этом мы не рассматриваем случаи предельно малых освещенностей, при которых эти равенства могут иногда нарушаться. В области нормального дневного освещения сохранение цветовых равенств является твердо установленным фактом.

Как следует из вышеизложенного, реальный цвет, видимый наблюдателем, определяется степенью возбуждения приемников глаза. Однако, как будет показано далее, это заключение не совсем правильное. Воспринимаемый цветовой тон может зависеть от ряда психологических факторов, совсем не связанных с вызывающим ощущение цвета стимулом. Однако при отсутствии таких факторов можно считать вполне установленным, что ощущение цвета определяется чувствительностью приемников глаза и состоянием их адаптации. Довольно легко поставить интересный эксперимент, подтверждающий этот факт.

Как уже указывалось, одновременный цветовой контраст в значительной степени изменяет цветовой тон. Отмечалось также, что последовательный образ, возникающий при кратковременном наблюдении цветного объекта и последующем наблюдении ахроматической поверхности, всегда дополнителен к цвету наблюдаемого объекта. Однако последовательный образ дополнителен к действительно видимому цвету объекта, но не рассчитанному исходя из стимула. Предположим, например, что наблюдается сине-зеленое поле, окруженное пурпурным, вследствие чего оно кажется наблюдателю чисто зеленым. Последовательный образ, появляющийся после наблюдения этой поверхности, будет иметь пурпурное центральное поле, окруженное зеленым, а не красное, как это имеет место при действии на глаз одного сине-зеленого цвета.

Рассмотрение вопроса о визуальной оценке цвета будет нами продолжено в гл. XIV, где детально будут рассмотрены вопросы наименования цветов, обнаружения цветовых различий, изменчивости обыкновенно наблюдаемых цветов, а также явление цветовой слепоты. Однако кажется целесообразным предварительно рассмотреть вопрос о психологии зрения в той степени, в какой он связан с цветом, а также изложить основы измерений и спецификации цвета.

Совершенно ясно, что вопросы восприятия цвета весьма сложны, и, чтобы установить связь между цветовыми ощущениями и вызывающими их световыми стимулами, необходимо принимать во внимание окружающие физические условия и физиологические особенности работы глаза. В последующих главах будет также показано, что полное решение этой задачи требует учета психологического состояния наблюдателя (в частности, его общего отношения к наблюдаемой сцене). Установив этот факт, мы будем иметь возможность рассматривать совместное действие всех трех факторов (физического, психофизического и психологического) на процесс цветового зрения.

ГЛАВА IX

Восприятие и иллюзии

В предыдущих главах на ряде примеров была показана сложная связь восприятия и вызывающего его стимула. При обсуждении этого вопроса мы учитывали только физические свойства стимула и психофизические свойства глаза, не уделяя особого внимания наблюдаемому объекту, как таковому. Единственное, что нас интересовало, это воспринимаемый цвет объекта. Однако нормальное зрительное восприятие больше связано с цветом как с указателем свойства объекта, а не со светом и цветом, как таковыми. Включив в рассмотрение вопрос об объекте наблюдения, мы сталкиваемся с необходимостью учета целого ряда дополнительных обстоятельств. Наблюдатель, который смотрит на объект, не думает о том, как он его воспринимает: его интересуют свойства самого объекта. Он пользуется зрением для того, чтобы увидеть (подтвердить) эти свойства. Более того, наблюдатель часто идет дальше, интерпретируя наблюдаемые факты, он может сделать выводы о некоторых свойствах самого объекта и окружающего его фона, которых непосредственно он не видит.

Процесс познания цвета

В процессе нашего познания цвета необходимо различать три фазы, причем ни одна из них не является более существенной по сравнению с другими, а степень их важности зависит от интересов наблюдателя. Первая фаза—непосредственное определение наблюдателем цвета объектов, когда он не задумывается над происхождением последнего. Эту фазу обычно называют простым ощущением цвета. Вторая и третья фазы связаны непосредственно с самим объектом, на который смотрит наблюдатель. Обычно наиболее непосредственно воспринимаются цвет объекта, его форма, тип поверхности и т. п. Хотя эти свойства объекта иногда называют кажущимися, мы обычно говорим, что яблоко круглое, блестящее и красное или зеленое, а не что оно кажется круглым, блестящим и красным или зеленым, при условии, что мы не сомневаемся в наших определениях. Следовательно, во второй фазе (восприятии) мы безоговорочно полагаемся на зрение и то, что мы видим, считаем самим объектом, а не его воспринимаемым изображением. В этом заключается целостность

природы познания. Мы «видим» воспринимаемый цвет, мы «видим» относительное расстояние и мы «видим» предмет. На третьей фазе познания наблюдатель не только видит объект, но на основании увиденного делает заключение о его свойствах, даже о тех, которые им зрительно не воспринимаются. Эту последнюю фазу обычно называют оценкой или представлением. Например, мы оцениваем расстояние, размер или вес или делаем вывод о наличии цветного объекта на основании отражения последнего на других предметах.

Процесс познания настолько для нас привычен, что только с некоторыми трудностями и обычно в результате определенной тренировки мы можем его разделить на три различные фазы: ощущение, восприятие и представление. Однако для правильного понимания цветовых явлений совершенно необходимо четко различать каждую из этих фаз. Первая фаза обычно наиболее понятна. Труднее отличить вторую фазу от третьей. Каждая из фаз соответствует столь различным позициям наблюдателя по отношению к свету, создающему изображение, что в зависимости от них цвета могут казаться совершенно различными при постоянном качестве света. В следующей главе этот вопрос будет рассматриваться более подробно применительно к ощущению светлоты, а то немногое, что нам известно об этом явлении в связи с цветностью излучения, собрано в гл. XI. Тем не менее затронутые вопросы для большинства читателей настолько неожиданны и так важны для полного понимания процесса познания цвета, что настоящая глава будет посвящена общему исследованию путей, по которым идет реакция мозга на зрительное ощущение. Мы выбрали восприятие пространства в качестве посредника при обсуждении этой проблемы, так как оно является более очевидной фазой познания, чем цвет, и потому, что оно может быть легко проиллюстрировано.

Знания, приобретенные в процессе восприятия

Указанные факты познания внешнего мира отличаются по степени их определенности и могут быть названы «знание» и «иллюзия». Это значит, что в результате зрительного восприятия приобретенная информация может быть правильным отражением внешнего мира, неправильным и может совсем не соответствовать реальной действительности [1]. Здесь мы остановимся только на первых двух случаях.

[1] Автор, разбирая вопросы цветовых восприятий, в основном стоит на правильной позиции, близкой к материалистической теории познания. Однако эта позиция проводится им не всегда достаточно последовательно и строго. В частности, слишком много внимания автор в последующем изложении уделяет роли иллюзий и галлюцинаций. В связи с этим материал главы нами несколько сокращен.— *Прим. ред.*

Когда встает задача отличить информацию, отвечающую действительности, от неправильной, нам приходится вступать в сферу философии. Здесь возникает трудность, связанная с тем, что познание внешнего мира основывается на информации, поступающей в мозг через наши ощущения, которые могут быть искажены под влиянием различных обстоятельств. Однако с рациональной точки зрения эти трудности несущественны. Споткнувшись о кирпич, мы достаточно хорошо убеждаемся, что увиденный кирпич действительно существует. Подобным же образом можно убедиться в реальности существования объектов внешнего мира. Для интересующих нас целей мы можем считать, что иллюзия — это восприятие существующей вне нас реальности, которое не совпадает с оценками, даваемыми другими органами чувств или основанными на прямых физических данных. В качестве примера приведем геометрические иллюзии. Здесь ошибка может быть легко выявлена путем изменения условий наблюдения или простых измерений. Однако тот факт, что восприятие глубины в двухмерной фигуре есть иллюзия, не так очевиден. Подобная иллюзия настолько скрыта (или так привычна), что иногда мы пользуемся ею так, как если бы она была реальностью.

Задача настоящей главы заключается в том, чтобы рассмотреть с правильных позиций и постараться дать объяснения довольно сложной цепи явлений, относящихся к взаимосвязи между физической природой стимула и его восприятием.

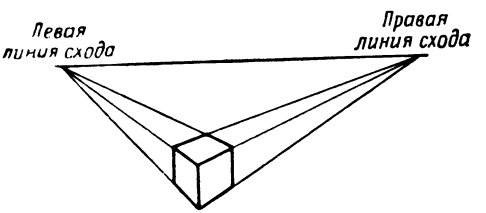
Восприятие глубины в репродукции

Начнем с рассмотрения вопроса о перспективе в репродукции. Разберем, почему нам кажется, что на репродукции изображено пространство, в то время как на самом деле она представляет собой плоскую двухмерную поверхность. Нет смысла подробно останавливаться на этой теме. Имеется ряд книг, в которых разбирается данный вопрос. Однако связанные с этим разнообразные проблемы психологии в них не учитываются. Тем не менее приведенный пример — прекрасная иллюстрация того, что восприятие может быть предопределено намерениями наблюдателя, природой стимула и зрительным механизмом вообще. Кроме того, он помогает понять, каким образом мы «видим» то, что мы *хотим* видеть, иногда даже в противоречии с фактами.

Начнем с самого начала. Когда зрение фиксируется на некотором пейзаже, наблюдаемые геометрические особенности всех предметов этого пейзажа не соответствуют их действительным размерам. Так, куб, изображенный на фиг. 9.1, сзади уже, чем спереди, а если продолжить боковые грани, то они сойдутся в точках горизонта. Такое же явление наблюдается, когда мы смотрим издали на два

железнодорожных вагона, стоящих на параллельных путях; они нам кажутся постепенно сходящимися. Это явление объясняется на основе простых законов перспективы тем, что размер изображения предмета, создаваемого хрусталиком глаза, уменьшается с увеличением расстояния предмета от глаза.

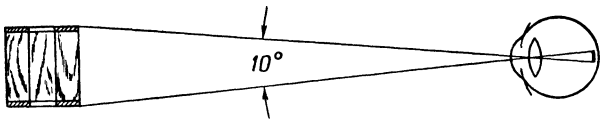
Мы научились переводить это свойство хрусталика в среднее расстояние и даже пошли дальше, мысленно рассматривая это явление непосредственно как расстояние. Мы настолько привыкли воспринимать расстояние таким образом, что у нас намечается тенденция выделять его из пейзажа как некое отдельное явление. Человек, идущий по другой стороне улицы, не кажется нам меньше, чем тот, который идет нам навстречу; просто он воспринимается несколько отдаленным от нас. Если же мы смотрим на людей с крыши высокого здания или с высоты фабричной трубы, то и в этом случае мы воспринимаем расстояние, и нас не смущает то, что люди кажутся нам муравьями. То, что мы воспринимаем расстояние, а не уменьшение размера предметов, до некоторой степени является привычкой зрения. Поэтому не удивительно, что, когда мы смотрим на нарисованный пейзаж, мы видим глубину, созданную пересечением линий и изменением размеров, а не плоскую поверхность репродукции. При наблюдении пейзажа мы ощущаем его правильно, вводя поправку на расстояние, в то время как при рассмотрении репродукции мы вольно или невольно подвергаемся иллюзии, так как в данном случае глубина реально не существует. Однако (так же как и при наблюдении с высокого здания) нам не покажется странным то, что, когда изображенное на репродукции отличается от привычного для нас изображения натуры, происходит потеря в восприятии глубины, как таковой, и картина начинает больше напоминать плоскую поверхность. Так как такая изменяющаяся взаимосвязь между установившимися привычками восприятия и реальностью, обнаруживаемой при прямом восприятии, определяет светлоту и цвет объектов в процессе их познания, стоит подробнее остановиться на некоторых факторах, придающих репродукции вид естественного пейзажа или, наоборот, превращающих ее в двухмерную бумагу или холст, чем она и является в действительности. На этих факторах основывается восприятие не только кажущейся глубины изображенных на репродукции предметов, но также кажущихся



Ф и г. 9.1. Перспективный чертеж куба, показывающий, что при продолжении его боковые стороны сходятся в двух точках справа и слева от него.

их размера и формы. При цветовом восприятии факторы, влияющие на наши суждения о глубине, могут быть несколько иными, но в основном они такие же, как и при восприятии глубины черно-белого объекта.

В репродукции переменными являются следующие факторы: геометрическая перспектива, контраст, четкость изображения, особенности поверхности материала и строение поверхности изображения. В фотографии такими переменными являются: угол зрения (увеличение), больший или меньший контраст, четкое или расплывчатое изображение, однородный или неравномерный тон, неровная



Ф и г. 9.2. Схема образования изображения коробки на сетчатке глаза.

или гладкая структура и блестящая или матовая поверхность бумаги. Каждая из этих переменных в черно-белом изображении влияет на восприятие глубины. Каждая из них будет рассмотрена ниже. Однако мы должны сделать следующее предупреждение. Иллюстрации в этой главе размещены таким образом, чтобы нельзя было рассматривать два изображения одного и того же пейзажа одновременно. Так как часто два изображения кажутся геометрически идентичными, у наблюдателя создается впечатление, что расстояния на этих изображениях одинаковые. Поэтому следует каждый рисунок рассматривать независимо от другого и анализировать впечатления от расстояния, представленного в нем, отдельно, тогда иллюстрации будут отвечать своему назначению в тексте. Иллюстрации приводятся здесь для того, чтобы наглядно продемонстрировать основные принципы, затрагиваемые нами. Читатель при желании без труда может найти и другие примеры, которые послужат иллюстрациями к тексту.

Рассмотрим вопрос об угле зрения пейзажа по сравнению с углом зрения его репродукции. Когда на сетчатке глаза создается изображение пейзажа, каждый предмет этого пейзажа может характеризоваться определенным углом зрения. Например, на фиг. 9.2 показано образование изображения коробки. Глаз находится на таком расстоянии от коробки и размер коробки таков, что угол зрения между двумя сторонами коробки равен 10°.

На расстояниях 0,61, 3,3 и 15,24 *м* размер коробки в поперечнике должен быть равен соответственно 10,6, 53,3 и 49,8 *см*, тогда угол будет оставаться равным 10°. Теперь предположим, что пейзаж сфотографирован с того же положения и с него сделан увели-

При сравнении верхней левой иллюстрации с правой видно, что лучшее восприятие глубины изображения создается скорее различием в относительной светлоте, чем различиями в цветности при пониженном светлотном контрасте. Сравнив нижнюю иллюстрацию с двумя верхними, мы увидим, что наилучшее восприятие глубины и наилучшее качество изображения обеспечивается при правильном сочетании различий по цветности и светлоте.

ченный или неувеличенный отпечаток. При рассматривании этой репродукции с определенного расстояния угол зрения, образованный двумя сторонами изображения коробки, будет таким же, как и в действительности. Если изображение на снимке значительно меньше предмета, то расстояние, с которого мы смотрим на снимок, может оказаться слишком малым для правильного зрительного восприятия предмета. Для всех снимков существует определеннсе

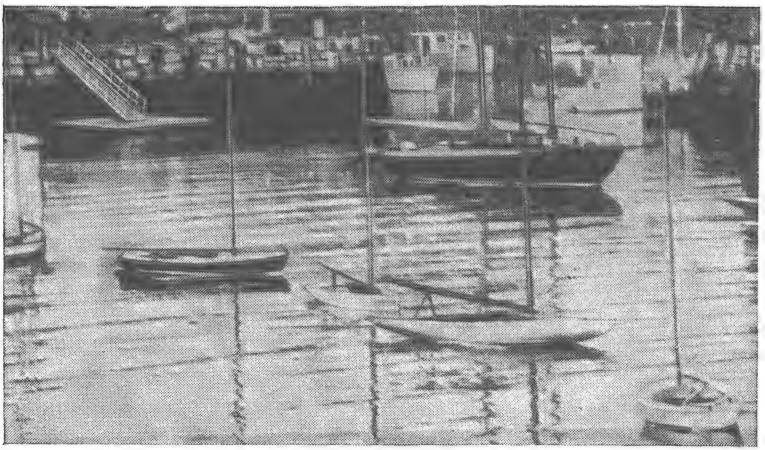
Ф и г. 9.3. Пейзаж при относительно большом расстоянии наблюдения.

«правильное» расстояние, с которого их следует рассматривать. Фотограф может грубо рассчитать это расстояние применительно к своему фотоаппарату путем умножения фокусного расстояния объектива на коэффициент увеличения при печатании данного снимка. Это произведение и есть расстояние наблюдения. Таким образом, при фокусном расстоянии объектива, равном 50 *мм*, и четырехкратном увеличении правильное расстояние наблюдения будет 200 *мм*. При увеличении в 8 раз правильное расстояние будет 400 *мм* и т. д.

Правильный выбор расстояния наблюдения обеспечивает правильную перспективу. В этом случае угловые соотношения, которые мы видим между предметами на рисунке, идентичны угловым соотношениям реальных предметов, если на них смотреть с должного положения. Достаточно хорошо выполненная картина при наблюдении с правильного расстояния может создать довольно сильное впечатление глубины и реальности, особенно если на нее смотреть одним глазом. Это чувство реальности объясняется, конечно, тем,

что в репродукции точно сохранена геометрия визуального изображения пейзажа, от которой в значительной степени зависит восприятие глубины.

Однако предположим, что расстояние наблюдения неправильное. Каким тогда будет восприятие репродукции? Небольшая

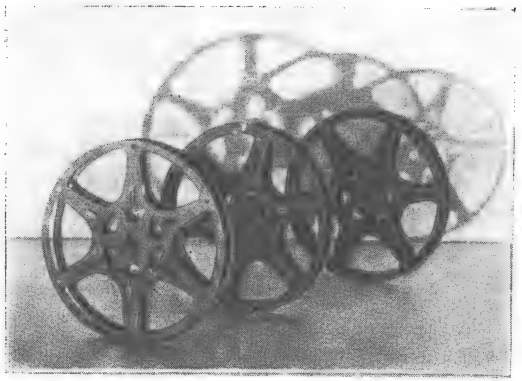


Фиг. 9.4. Увеличенный фрагмент пейзажа фиг. 9.3
Глубина изображения значительно снижена.

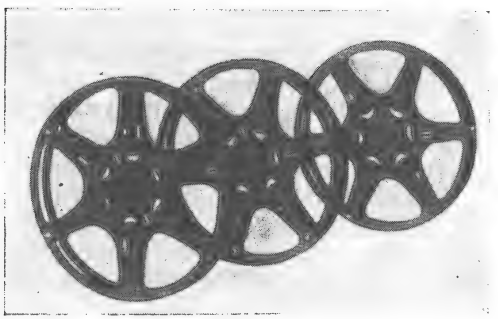
проверка показывает, что при уменьшении расстояния наблюдения кажущаяся глубина предметов будет уменьшаться, а при увеличении расстояния наблюдения она будет увеличиваться до расстояния, превышающего оптимальное в 10 раз. Этот эффект связан с геометрией изображения, образованного на сетчатке глаза, и является естественным следствием иллюзии того, что наблюдаемая сцена всегда имеет определенную глубину. Изменение восприятия глубины в зависимости от расстояния наблюдения снимка может быть проиллюстрировано фиг. 9.3 и 9.4.

Считается, что во всех отношениях фотографический снимок соответствует реальному предмету и создает на сетчатке глаза наблюдателя изображение, совпадающее с натурой. Однако изображение предмета на снимке во многом может отличаться от действительного предмета, причем почти всегда эти отличия влияют на восприятие глубины. Мы очень мало знаем о том, какое влияние на восприятие черно-белого фотографического снимка оказывает цвет, однако все сходятся на том, что изображение на цветной фотографии кажется более глубоким. Мы не будем касаться цвета, а остановимся на других факторах, связанных с восприятием глубины.

Самые простые исследования сразу же обнаруживают, что одной из наиболее важных переменных, оказывающих влияние на восприятие глубины, является *контрастность* репродукции. Не существенно, является ли контраст результатом освещения или следствием



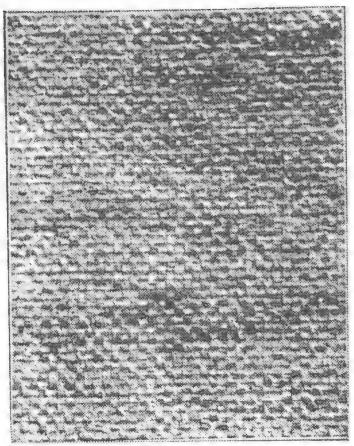
Фиг. 9.5. Изображение объекта, освещенного с умеренно высоким контрастом.



Фиг. 9.6. Изображение того же объекта, что и на фиг. 9.5, но при неконтрастном освещении. Глубина изображения заметно снижена.

особенностей фотографического процесса. Повышение контраста усиливает ощущение глубины, понижение контраста ослабляет это ощущение. На фиг. 9.5 приведено изображение предметов, освещенных с умеренно высоким контрастом, а на фиг. 9.6 изображены те же предметы при низкоконтрастном освещении. Обратим внимание на то, что геометрически предметы идентичны; разница лишь в тенях,

но кажущаяся глубина их весьма различна. На фиг. 9.7 приведен снимок, контрастность которого повышена фотографическим путем, а на фиг. 9.8 — тот же снимок с пониженным контрастом. Эти две фотографии совершенно идентичны, за исключением различий в передаче деталей теней, а также контраста. Значительно бóльшая глубина видна на снимке с более высоким контрастом. В фотографии это явление настолько очевидно, что получило специальное название. Малоконтрастные снимки известны в обиходе как плоские, так как изображение на них кажется плоским, а снимки с высоким контрастом, достигнутым путем соответствующего освещения или в процессе печатания, называются рельефными или выпуклыми. Эти названия вполне справедливы и связаны со степенью восприятия глубины. Однако заметим, что они применимы лишь к снимкам с одинаковой перспективой. Существенно, что этот эффект связан только с изменением восприятия при неизменной геометрии изображенных предметов.

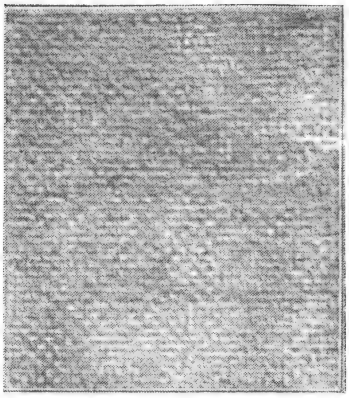


Ф и г. 9.7. Фотография, отпечатанная с высоким контрастом.

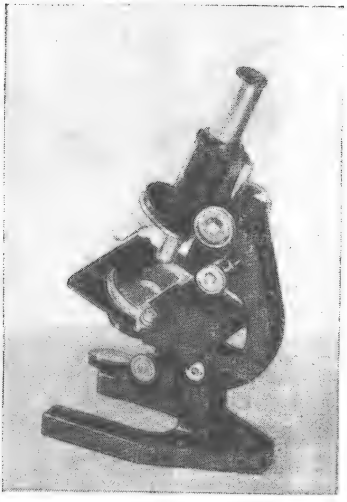
Другой переменной, вызывающей тот же эффект, является четкость изображения. На фиг. 9.9 изображен предмет, сфотографированный с большой резкостью, а на фиг. 9.10 — тот же предмет, сфотографированный со значительным «рассеянием». Описываемое явление здесь сильно преувеличено с целью достижения наглядности, но по этим снимкам мы можем более или менее правильно судить о том, как оценивается изображение при нечетком отпечатке. Во многих случаях, в частности в портретной фотографии, изменение в восприятии глубины может быть настолько сильным, что кажутся изменившимися форма головы и черты лица. Высокая степень резкости, так же как и хороший контраст, обеспечивает более нормальное восприятие глубины, а низкая степень резкости делает рисунок плоским, «прижимает» его к бумаге. Как только в репродукции появляется какая-нибудь особенность, отличающая ее от изображаемой действительности, восприятие глубины понижается и репродукция начинает казаться двухмерной поверхностью, каковой она и является в действительности. Другими словами, характерные особенности *отпечатка*, отличные от *оригинала*, приводят к тому, что скорее воспринимается отпечаток, нежели реальный объект. Существенно то, что в действительности восприятие соответ-

ствует чему-то промежуточному между самой репродукцией и оригиналом, причем характер восприятия зависит от ряда факторов. Как мы увидим ниже, на восприятие может оказывать существенное влияние отношение наблюдателя к наблюдаемому объекту, но вначале мы хотим привести еще один пример.

Любой фактор, привлекающий внимание к поверхности бумаги, обязательно повлечет за собой понижение восприятия глубины изображения. Основными тремя факторами, оказывающими влияние на восприятие глубины изображения, являются: строение (фактура) бумаги, характер отражений света от ее поверхности и характер самого изображения. Так как все эти факторы связаны с одним и тем же явлением, их можно проиллюстрировать одним примером; для удобства проиллюстрируем структуру изображения. Фотограф может привести примеры, описав результаты печатания на гладкой или зернистой, глянцевой или матовой бумаге. На фиг. 9.11 показана фотография, выполненная способом полутоновой растровой печати с применением очень тонкого растра (50 *лин/см*), который не заметен на обычном расстоянии. На фиг. 9.12 приведен тот же снимок, только выполненный с очень крупным растром (20 *лин/см*), который виден с того же расстояния. Потерю глубины на этом снимке можно объяснить тем, что очень бросается в глаза фактура бумаги. Кроме того, заметна некоторая потеря деталей и снижение контраста; как то, так и другое влияет на вид снимка. На фиг. 9.13 и 9.14 показано, как выглядит снимок, отпечатанный на нормальной и сильно зернистой бумаге. Здесь опять ясно видно, что изображение лежит на поверхности бумаги, вследствие чего



Фиг. 9.8. Изображение того же объекта, что и на фиг. 9.7, но отпечатанное менее контрастно. В результате кажущаяся глубина изображения снижена.

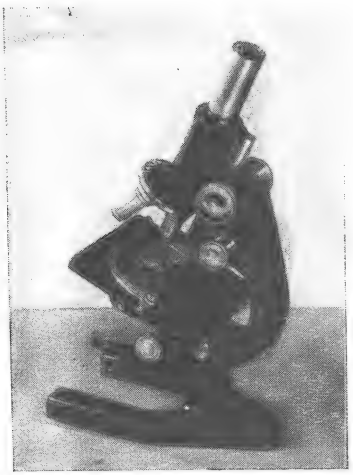


Фиг. 9.9. Предмет, сфотографированный с большой резкостью изображения.

полностью пропадает ощущение перспективы и соответственно понижается восприятие глубины.

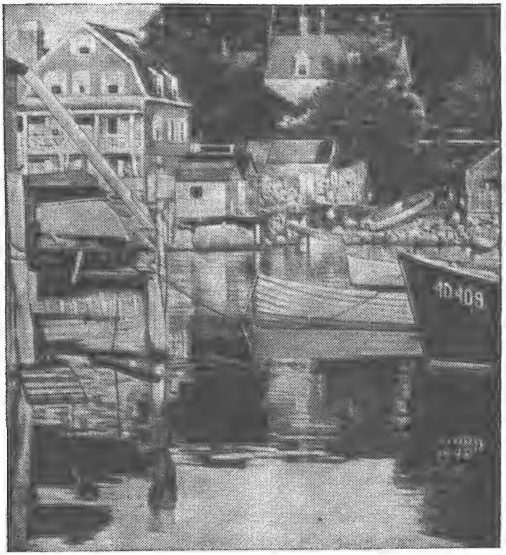
Иллюзия размера при восприятии глубины

Идея непосредственного восприятия глубины может показаться некоторым странной и трудной для понимания. Однако у тех, кому она понятна, возникает вопрос о разнице между иллюзией и действительностью в связи с восприятием глубины. Иллюзией объясняется то, что мы воспринимаем глубину в двухмерном изображении; восприятие зависит от силы иллюзии. В этом отношении люди настолько отличаются друг от друга, что очень трудно привести конкретные примеры, однако мы попробуем разъяснить вопрос следующим образом.



Ф и г. 9.10. Тот же предмет, что и на фиг. 9.9, но сфотографированный при использовании рассеивателя на объективе.

На фиг. 9.15 приведен снимок, сделанный в парке. Размеры фонарных столбов по обеим сторонам улицы кажутся одинаковыми, и оградительные столбики справа тоже кажутся одной высоты. Глядя на рисунок, можно отчетливо представить себе расстояние от переднего плана до фона. При этом можно увидеть не только то, что утверждение о равенстве размеров фонарных столбов и столбиков в натуре соответствует действительности, но и то, что на отпечатке размер их изображений различен в соответствии с законами перспективы. Интересно, что большинство людей неправильно оценивают соотношение размеров, так как из-за очень сильного восприятия глубины происходит уравнивание размеров, несмотря на сознательную попытку преодолеть это. На фиг. 9.16 приведен тот же снимок, но теперь рядом с изображением ближайшего фонарного столба помещено второе изображение дальнего столба, а рядом с изображением ближайшего к нам оградительного столбика—изображение самого дальнего столбика. Такое соотношение размеров большинству покажется не соответствующим действительности. Однако если мы произведем измерения, то увидим, что это соотношение правильное. Следовательно, иллюзия глубины противостоит геометрическим данным и вызывает иллюзию разницы в размерах между идентичными предметами. Заметим, между прочим, что



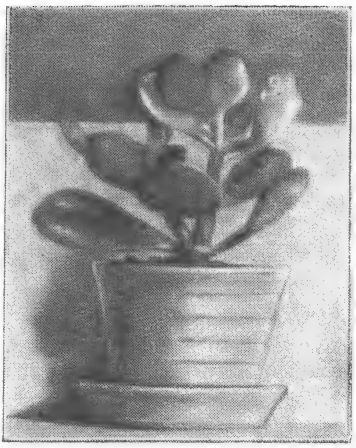
Ф и г. 9.11. Фотоснимок, отпечатанный способом полутоновой печати (растр 50 *лин/см*).

Ф и г. 9.12. Тот же снимок, что и на фиг. 9.11, отпечатанный способом полутоновой печати (растр 20 *лин/см*).

иллюзия состоит не в искажении вида предметов, а в том, что на изображении трудно увидеть последние в их действительном геометрическом соотношении.

Иллюзия глубины зависит от условий фотографирования. Восприятие глубины реального пейзажа также изменяется, хотя мы так привыкли не обращать внимания на подобные факты, что нам

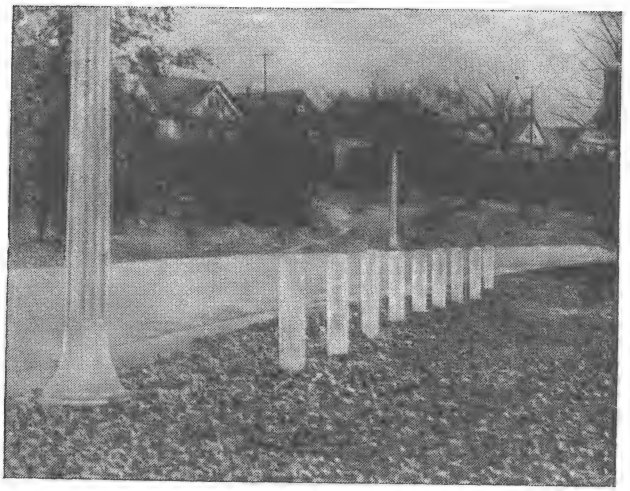
Ф и г. 9.13. Снимок, выполненный обычным способом.



Ф и г. 9.14. Снимок того же предмета, что и на фиг. 9.13, но выполненный при большой «зернистости» фотографического процесса.

трудно заметить эти изменения. Например, при легком тумане восприятие глубины пейзажа совсем не такое, как в ясный день: глубина и даже форма предметов в ясные солнечные дни воспринимаются иначе, чем в пасмурные. Именно эта разница во внешнем виде, расстоянии, форме и размере придает такое очарование пейзажу. Читателю, которому посчастливилось наблюдать изменение ландшафта под влиянием изменения погоды и смены времени года, не надо объяснять, что это значит. Прежде чем разбирать вопрос об иллюзиях более подробно, следует указать еще на одну особенность непосредственного восприятия глубины и размера. Многие фотографы, а в некоторых случаях и художники, замечали, что иногда на фотографии или на картине изображенные предметы кажутся не того размера или не той формы, что в действительности; бывает также, что они воспринимаются и не на том расстоянии,

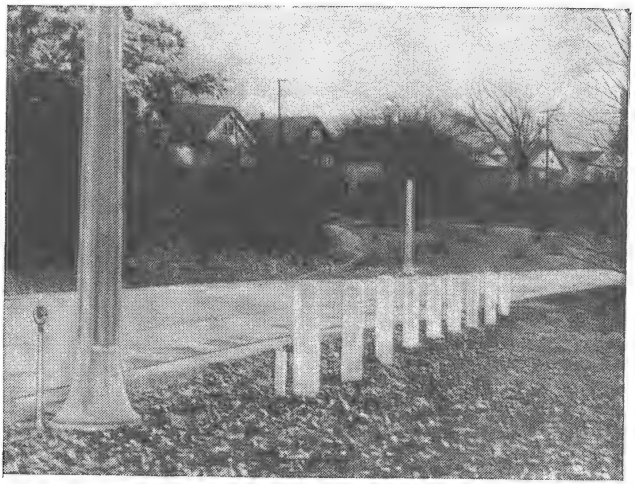
что на самом деле. Причина этого заключается, во-первых, в том, что если факторы, о которых мы говорили выше (строение, контраст и пр.), влияют на прямое восприятие глубины, то картина, в которой глубина воспринимается неправильно из-за этих факторов, не будет иметь правильную перспективу. Если перспектива неправильна, форма предметов, а также их кажущееся расположение относительно друг друга тоже будут неправильными.



Ф и г. 9.15. Фотография пейзажа с нормальным перспективным соотношением.

Как уже упоминалось, из-за неправильной перспективы может быть искажена форма лица на портрете; влияние перспективы на другие предметы, менее знакомые, может быть еще более заметным. Вторая причина несколько более абстрактна, но не менее реальна. Когда мы смотрим на предмет или на пейзаж, какая-то часть этого пейзажа больше привлекает наше внимание, чем остальные его участки. При этом условии воспринимаемый размер предмета или группы предметов имеет определенную величину. Однако в репродукции с пейзажа точное воспроизведение угла зрения предмета при его зрительном восприятии не достаточно для того, чтобы этот предмет казался правильного размера. Некоторые предметы на репродукции должны иметь значительно больший или значительно меньший угол зрения, чем в действительности, для того, чтобы они правильно воспринимались. Это явление еще не настолько хорошо исследовано, чтобы можно было говорить о каких-либо количественных

оценках, но мы знаем, что во многих случаях угол зрения для объекта на репродукции приходится увеличивать в 2—3 раза по сравнению с действительным, чтобы этот объект воспринимался правильно, и, наоборот, часто для правильного восприятия объектов угол зрения в репродукции должен иметь величину, меньшую действительной. Очевидный вопрос о том, как это явление связано



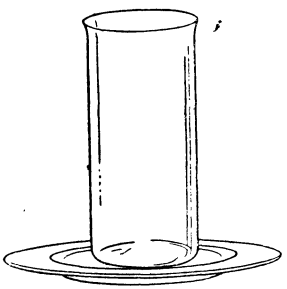
Фиг. 9.16. Тот же снимок, что и на фиг. 9.15, но рядом с передним фонарным столбом и первым оградительным столбиком помещены изображения соответственно дальнего фонарного столба и последнего оградительного столбика.

с перспективой, пока еще не был достаточно исследован. Следовательно, иллюзия правильного размера по отношению к глубине это не просто вопрос перспективы или даже природы воспроизведения. Эта иллюзия зависит также от особенностей восприятия пейзажа наблюдателем.

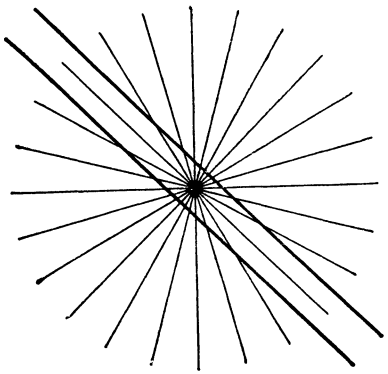
Зрительные иллюзии

Одна из наиболее известных иллюзий заключается в том, что вертикальные прямые всегда кажутся длиннее горизонтальных. Это видно из фиг. 9.17. Заметим, что как результат непосредственного восприятия, так и результат тщательно произведенной оценки не совпадают с результатами непосредственных измерений. Это явление обычно объясняют свойствами глаза.

Другая иллюзия, которую тоже можно приписать свойствам глаза, связана с кажущимся искажением параллельных прямых под влиянием других прямых, пересекающих их под определенными углами. Как видно на фиг. 9.18, две параллельные прямые пересекаются прямыми, исходящими из точки, расположенной между ними. Нам кажется, что прямые в средней части выгибаются.



Фиг. 9.17. Иллюзия, при которой высота стакана кажется больше диаметра тарелки (в действительности — наоборот).

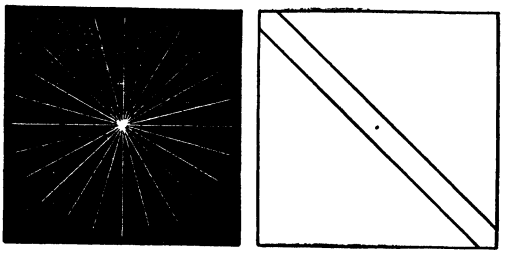


Фиг. 9.18. Иллюзия, при которой две параллельные прямые кажутся выгнутыми в средней части.

Можно добиться такого же впечатления и другим путем. На фиг. 9.19 показаны отдельно две параллельные прямые и прямые, пересекающиеся в центре. Если читатель при достаточно большой освещенности книги будет в течение 15—20 *сек*, не отрываясь, смотреть в центр пересекающихся прямых, а затем резко переведет глаза на точку между параллельными прямыми, ему опять покажется, что прямые выгибаются в средней части, несмотря на то что *в данном случае* он непосредственно не видит пересекающихся прямых. Следовательно, влияние радиальных прямых на зрение продолжается достаточно долго и проявляется при наблюдении параллельных прямых. Очевидный параллелизм между этим случаем и явлением перспективы в изображении говорит за то, что восприятие глубины может быть объяснено физиологическими эффектами. Однако, насколько известно автору, данный вопрос никогда не исследовался с этой точки зрения.

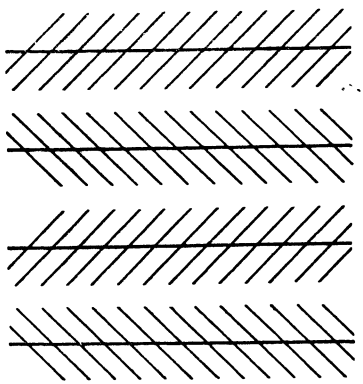
Кёлер [39] в своей статье по применению теории Гештальта к зрению разработал «теорию поля» зрения, которая среди прочих вопросов объясняет вопрос влияния радиальных прямых на зритель-

ное восприятие параллельных прямых и другие подобные явления. Важно помнить о том, что явления, о которых упоминалось, и те, которые мы собираемся сейчас обсудить, *обязательно* имеют место

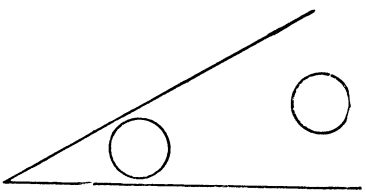


Фиг. 9.19. Если смотреть пристально в центр левого рисунка в течение 15—20 *сек*, а затем быстро перевести взгляд на точку в центре правого рисунка, то покажется, что параллельные прямые в средней части выгибаются.

как в тех случаях, когда восприятие правильное, так и тогда, что наиболее интересно, когда оно не соответствует действительности. Таким образом, полезные свойства глаза ведут обычно к правильному восприятию, но иногда и к неправильному. Целесообразно рассмотреть еще несколько примеров, помня о том, что наша цель — показать, как работает глаз, а не создавать атмосферу загадочности.



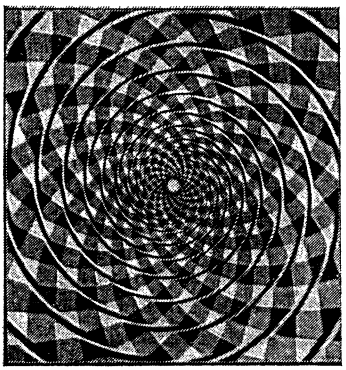
Фиг. 9.20. Иллюзия, при которой параллельные прямые воспринимаются как непараллельные.



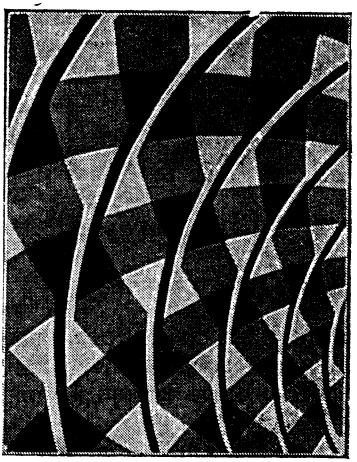
Фиг. 9.21. Иллюзия того, что размеры окружностей разные, а в действительности они одинаковые.

Как показано на фиг. 9.20, в результате влияния группы близко расположенных друг к другу прямых на зрительное восприятие прямой, направленной под углом к ним, почти всегда искажается форма этой прямой или ее кажущееся местоположение. Когда две

геометрические фигуры находятся на фоне третьей, то та из первых двух, которая расположена ближе к сторонам третьей, кажется больше (фиг. 9.21). Это явление, а также многие другие подобные явления можно предсказать с помощью теории Кёлера. Фиг. 9.22 иллюстрирует несколько иное явление. Здесь изображены концентрические окружности, которые воспринимаются как спираль из-за того, что короткие отрезки прямых пересекают по диагонали эти окружности в местах их пересечения с фоном. Эти диагональные



Ф и г. 9.22. Иллюзия, при которой концентрические окружности воспринимаются как спираль.



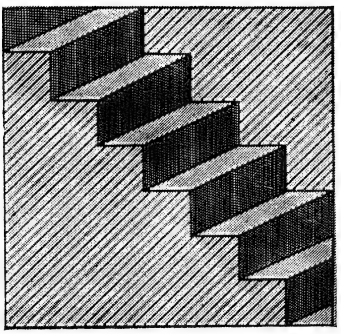
Ф и г. 9.23. Увеличенный фрагмент фиг. 9.22, демонстрирующий, как изображены концентрические окружности.

прямые отчетливо видны на фиг. 9.23, где дан увеличенный фрагмент фиг. 9.22. Здесь опять налицо непосредственно физиологическая функция глаза или низших отделов мозга.

Однако можно привести много примеров, ясно показывающих роль мышления в процессе восприятия. Одним из таких примеров может служить восприятие неопределенных фигур, таких, как показанная на фиг. 9.24. Здесь перспектива и деталь правильны с двух совершенно различных точек зрения и восприятие колеблется более или менее произвольно между двумя возможностями.

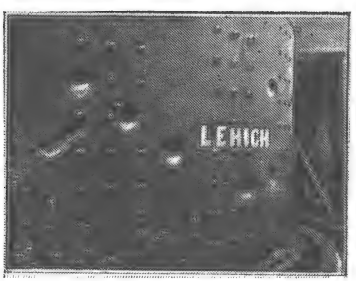
Примером крайнего различия в суждении, основанного, очевидно, на чисто мысленной привычке (у многих отсутствующей), может служить восприятие фотографии, приведенной на фиг. 9.25. Снимок был сделан при освещении объекта из правого верхнего угла

со стороны наблюдателя. Вмятины на круглой поверхности бака видны благодаря теням на верхней части вмятин. Хотя в данном случае восприятие совершенно правильно, оно не является единственно возможным. Если бы мы представили себе, что освещение идет снизу, мы бы восприняли снимок иначе. Можно убедиться в правильности сказанного, если посмотреть на фиг. 9.26, где помещена та же фотография, но в перевернутом виде. Здесь вмятины кажутся выпуклостями. Это явление настолько существенно и настолько обычно, что архитекторы при изображении зданий на бумаге дают «освещение» с левого верхнего угла (независимо от того, возможно ли это в действительности), чтобы определенные детали здания воспринимались правильно с точки зрения глубины.

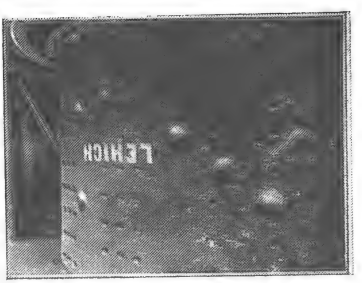


Ф и г. 9.24. Неопределенная лестница.
Над ней мы или под ней?

Наша цель — показать непосвященному читателю, что прямое восприятие кажущейся реальности связано со многими факторами. Зрительное восприятие, кажущееся нам реальным, имеет ряд особенностей, часть которых можно рассматривать как свойства глаза



Ф и г. 9.25. Фотография бака.
На поверхности его видны вмятины и головки болтов.



Ф и г. 9.26. Тот же снимок, что и на фиг. 9.25, но в перевернутом виде.
Вмятины воспринимаются как выпуклости, а выступающие головки болтов как вмятины.

или мозга, но которые все основаны на полученной в процессе познания информаций, приобретаемых на протяжении всей жизни индивидуума. Наивное мнение о том, что вещь всегда такова, какой мы

ее видим, не должно иметь места в науке о цвете. Необходимо, во-первых, не полагаясь на зрительное восприятие, узнать, каковы физические особенности объекта, во-вторых, надо определить, каким образом эти особенности воспринимаются наблюдателем, и, наконец, посмотреть, как отношение наблюдателя к этим особенностям влияет на восприятие. Только после этого можно составить правильное представление об объекте.

Анализ условий зрительного восприятия

Резкая разница в мнениях ученых, работающих в этой области, объясняется сложностью зрительного процесса. Каждый добросовестный исследователь старается так подобрать условия эксперимента, чтобы полученные результаты были наиболее правильными. Для этого он использует специальные приборы и установки. Не имеет значения, сложен эксперимент или прост, простыми стимулами пользуется исследователь или сложными. Всегда одним из условий, которые исследователь пытается контролировать, является отношение наблюдателя к созданной обстановке. Отсюда обязательно следует, что результаты эксперимента относятся только к данной обстановке и только к данному субъективному восприятию. Проводилась работа и по исследованию различий в восприятии отдельных наблюдателей, но, к сожалению, таких исследований очень мало. На некоторых из них мы остановимся в следующей главе.

Прежде чем приступить к подробному исследованию восприятия светлоты, стоит на ряде примеров проанализировать влияние условий наблюдения на зрительные восприятия.

Предположим, что наблюдатель смотрит на пейзаж, в котором имеются как близко расположенные, так и отдаленные предметы. Допустим, что день ясный, солнечный, небо синее, почти безоблачное. Представим себе далее, что наблюдатель — художник и что его прежде всего интересует качество света в пейзаже. Очень вероятно, что он в отличие от обычного наблюдателя гораздо больше заинтересован в исследовании света и цвета, попадающего ему в глаз с каждого участка пейзажа, чем в форме или цвете самих предметов. В этом случае наблюдатель будет подробно анализировать цвет света, отраженного от поверхности ландшафта, а природа объектов наблюдения ему будет более или менее безразлична. Он будет интересоваться цветом как *ощущением*, а не своим восприятием *объектов*. Теперь представим себе, что будучи профессионально заинтересованным в цвете, он удивится, обнаружив, что, например, такой знакомый объект, как лист на дереве, отражает в глаз яркий синий свет. Наблюдатель знает, что лист должен быть зеленым и продолжает рассматривать его *как лист*, чтобы увидеть, что *он*

зеленый. Он *обнаружит*, что свет, отраженный по крайней мере с некоторых участков листа, зеленый, и наблюдатель вновь будет воспринимать лист зеленым. Теперь наблюдателю все станет ясно, особенно после того, как он обнаружит, что лист от некоторых участков своей поверхности отражает синее небо. Однако на основании подобных наблюдений можно сделать вывод, что лист в действительности зеленый, а синим он кажется вследствие отражения. Наблюдатель может доказать правильность своего вывода, изменяя положение головы или листа, т. е. изменяя угол зрения, в результате чего будет меняться отражение.

Мы приняли, что наблюдатель — художник, так как благодаря своему опыту и способностям он сможет наилучшим образом произвести анализ. Если бы наблюдателем был лесовод, было бы логично предположить, что он никогда не увидел бы синеву листа, только как отражение сине-белого освещения, падающего на дерево с нормальными зелеными листьями. Если бы ему и случилось увидеть, что лист синий, он бы счел это за иллюзию и быстро опроверг бы свое ощущение путем проверки. Так как интерес наблюдателя сконцентрирован на объекте, его выводы делались бы на основании учета свойств дерева, а не света. Если внимание наблюдателя было бы привлечено синим цветом листвы и синева не пропадала бы, несмотря на изменение угла зрения, то выводы о причинах такого восприятия, сделанные самим наблюдателем, могли бы быть правильными или неправильными, но, вероятно, он никогда не поверил бы в то, что лист в действительности синий.

Если в качестве наблюдателя выбран человек, занимающийся изучением цвета, он может точно объяснить себе синий цвет листа, исходя из особенностей отражательной способности блестящей поверхности листа; вывод, сделанный им, будет основан именно на этом блеске поверхности.

То, что человек видит, и вывод, который он делает на основании увиденного, зависят от квалификации наблюдателя, его наклонностей и целей. В следующей главе мы увидим, что эти факторы ведут к изменению восприятий внешнего вида объектов, причем сила их влияния может быть весьма значительна.

ГЛАВА X

Восприятие светлоты

Одна из областей, в которой большую роль играет отношение наблюдателя,— это восприятие светлоты и ее влияние на форму, глубину, видимые характеристики поверхности объектов и т. п. В этой области становится наиболее ясным то различие, которое имеет место между физическим стимулом и его восприятием. Мы попытаемся рассмотреть зависимость восприятия светлоты как от физической природы стимулов, так и от психофизических свойств глаза. При этом всегда следует помнить, что светлота является одной из наиболее важных характеристик цвета.

Терминология

Для ясного изложения предмета возникает необходимость в использовании ряда терминов, которые до настоящего времени мы не применяли. Так называемый эффект постоянства светлоты для человека, не знакомого с его значением, кажется поразительным. Необходимость в введении сложной терминологии возникает потому, что один и тот же стимул может вызывать различную реакцию в зависимости от условий наблюдения. Поэтому мы начнем с повторного рассмотрения терминов, которые будут использоваться, и попытаемся уточнить их смысл. Поскольку значение терминов требует иногда соответствующего обсуждения и пояснения, смысл их будет уточняться по мере увеличения наших познаний в этой области.

Как следует из табл. 1.1, многие термины, относящиеся к зрению, могут характеризовать интенсивность света безотносительно к его цвету. Как чисто физическое явление свет называют лучистой энергией. Эффективность этой лучистой энергии, оцененная средним глазом, называется яркостью. Ощущение яркости называется светлотой. Из табл. 10.1 следует, что иногда необходимо пользоваться также термином «белизна». Ниже обсуждается различие между светлотой и белизной

Необходимо ввести еще один термин — «световая отражательная способность»,— определяющий эффективное *отражение поверхностью* данного *излучения*, оцененное глазом. Слово «световая» означает, что излучение оценивается по отношению к глазу, и в

последующем изложении будет опускаться. Из этой группы терминов для понимания вопроса жизненно необходимы четыре. Они разъясняются ниже.

1. *Отражательная способность* (световая). Отражательная способность характеризуется долей света, отраженного поверхностью при данных условиях. Числовая характеристика отражательной способности (коэффициент отражения) может быть получена путем последовательного умножения (для отдельных длин волн) энергии источника света на долю излучения данной длины волны, отражаемого поверхностью, и на чувствительность глаза для данной длины волны. Затем произведения для отдельных длин волн нужно суммировать и разделить на полную энергию излучения, *падающего* на поверхность и оцененного тем же способом по отношению к глазу. Таким образом, отражательная способность — это отношение отраженного излучения к падающему, оцененное глазом, *рассматриваемым в качестве стандартизованного приемника*[1]. При этом не принимаются во внимание какие-либо психологические или другие эффекты, обусловленные окружающим полем или связанные с тем, в каком состоянии находится глаз в данный момент. Если отражательная способность двух поверхностей имеет одинаковую величину, это означает, что отражающие поверхности будут казаться равнояркими, однако лишь при условии, что они будут помещены рядом под одним и тем же осветителем. Это равенство соответствует «условиям сравнения», обсуждавшимся в гл. VIII, и выдерживается почти для любого состояния глаза. Следовательно, отражательная способность — это характеристика *поверхности*, зависящая от спектрального распределения энергии источника света (например, «красная» поверхность обладает малой отражательной способностью для синего и зеленого света и высокой для красного света и т. д.). В настоящей главе мы будем рассматривать в основном серые неселективные поверхности, отражение которых не зависит от цвета источника света, поскольку они отражают постоянную долю света для всех длин волн. С зависимостью отражательной способности от цвета излучения мы столкнемся в следующей главе, при рассмотрении цветных поверхностей (гл. XI)[2].

---

[1] Более точно коэффициент отражения может быть определен как отношение светового потока, отраженного данной поверхностью, к падающему на нее световому потоку.— *Прим. ред.*

[2] Помимо коэффициента отражения, свойства поверхности могут характеризоваться также коэффициентом яркости. Под коэффициентом яркости понимается отношение яркости поверхности в данном направлении к соответствующей яркости идеально белой поверхности, равномерно рассеивающей весь падающий на нее свет. Коэффициент яркости зависит, следовательно, от направления наблюдения. В то время как коэффициент отражения никогда не может быть больше единицы, коэффициент яркости, например, при зеркальном отражении может иметь величину, значительно бо́льшую единицы.— *Прим. ред.*

2. *Яркость.* Термин «яркость» характеризует эффективность данного излучения *по отношению к глазу* независимо от происхождения этого излучения. Таким образом, яркость любого излучения, попадающего в глаз, может быть рассчитана суммированием произведений энергии излучения и чувствительности глаза для отдельных длин волн[1]. Полученный результат определяет эффективную интенсивность излучения по его действию на глаз. Если отражательная способность является характеристикой поверхности при данном излучении, то яркость—чисто психофизическая величина — является характеристикой *самого* излучения, не учитывающей влияние условий наблюдения. Две поверхности с численно равными яркостями будут казаться равносветлыми при расположении рядом на одинаковом фоне и при одинаковых условиях наблюдения.

Таким образом, отражательная способность и яркость определяют стимулы в соответствии со свойствами глаза, но не характеризуют световые ощущения.

3. *Светлота.* Светлота характеризует ощущение света данной яркости, соответствующее конкретным условиям наблюдения. Светлота не определяется однозначно яркостью или отражательной способностью.

Светлота — это ощущение, вызываемое светом, она может быть определена также как кажущаяся яркость излучения. Необходимость в слове «кажущаяся» очевидна. Одна и та же яркость при изменении условий наблюдения может вызвать ощущение различной светлоты; две равные светлоты не обязательно соответствуют равным яркостям. Равенство светлот обычно означает лишь равенство *психологических* оценок интенсивностей двух источников излучения, физического равенства которых даже при учете чувствительности глаза может и не существовать[2].

4. *Белизна.* Если светлота характеризует восприятие яркости, то белизна характеризует восприятие отражательной способности. Некоторым читателям может показаться удивительной возможность визуального разделения в этом случае, так как очевидно, что поверхность видна лишь постольку, поскольку она отражает свет по направлению к глазу. Именно этот вопрос нам и следует обсудить. Как и светлота, белизна относится к *психологической*

[1] Яркость может быть рассчитана путем умножения спектральной энергетической яркости источника света для каждой длины волны на кривую видности глаза и суммирования этих произведений для всего видимого спектра.— *Прим. ред.*

[2] Данное автором определение светлоты как величины светового ощущения, зависящего от индивидуальных особенностей наблюдателя и всех условий наблюдения, исключающее практически возможность ее измерения, не является общепринятым. Часто под светлотой понимают величину, лишь определяющую ощущения яркости и связанную с ней вполне определенным соотношением, учитывающим нелинейную связь светлоты и яркости. См. [8] в списке дополнительной литературы.— *Прим. ред.*

фазе зрения. Две поверхности одинаковой белизны не обязательно обладают одинаковой отражательной способностью, и, наоборот, две поверхности, которые оказываются одинаковыми в результате физических и психофизических расчетов, не обязательно обладают одинаковой белизной[1]. Поверхности равной белизны имеют одинаковые психологические эффективности, в то время как их психофизическая оценка определяется отражательной способностью.

Яркость и отражательная способность с психофизической точки зрения и светлота и белизна с психологической — это те характеристики, которые мы должны рассмотреть. Необходимо заметить следующее. Сравнивая цвета, мы обычно говорим «светлее и темнее» и «белее и темнее», имея в виду соответственно светлоту и белизну. Однако в этом случае читатель не может различить, о каких двух типах «темного» идет речь. Для того чтобы избежать ошибок, мы будем пользоваться выражениями «менее светлый» и «менее белый».

Постоянство светлоты

Явление, которое мы будем обсуждать, во многих книгах по физиологии называется постоянством светлоты. Для того чтобы не могло возникнуть недоразумений, мы сохраним этот термин и в настоящем изложении, хотя более точно было бы говорить о «приблизительном постоянстве белизны».

Явление постоянства светлоты наиболее простым способом может быть продемонстрировано с помощью двух одинаковых светло-серых квадратов из бумаги, помещенных в центре двух больших квадратных щитов из белого картона. Эти щиты обладают той интересной особенностью, что в обычной комнате их невозможно поместить таким образом, чтобы внешняя белая часть казалась серой в обычном смысле этого слова, хотя яркость серого участка в области высоких освещенностей может быть во много раз больше яркости белой части квадрата в области, где освещенность низкая.

Легко показать, как это отмечалось Герингом [29], что восприятие серого возникает в том случае, когда в поле зрения наблюдателя имеется более светлый участок. Как правило, любой свет, который можно рассматривать как неокрашенный, будет *казаться* серым, если вблизи имеется более светлый неокрашенный свет, с которым его можно сравнивать. Несущественно, какова природа этого света, его происхождение — все равно, излучается ли он

[1] Более правильно определять белизну как степень приближения цвета данной поверхности к идеально белой, оценивая ее числом цветовых порогов различения. Величину, определяемую автором, можно было бы назвать кажущейся отражательной способностью. Оба понятия совпадают лишь для серых образцов. — *Прим. ред*

непосредственно источником света или наблюдается после отражения. Единственными требованиями являются бесцветность и большая светлота. Показателен эксперимент, при котором световое пятно проецируется на экран, создавая достаточно интенсивно освещенное пятно так, что оно кажется глазу белым. Если это пятно окружить более светлой поверхностью, то оно покажется серым. Такой же эффект можно наблюдать и при использовании оптического прибора, за исключением того случая, когда первое пятно, наблюдаемое отдельно, будет казаться просто бесцветным, а не белым, но, как только появится более светлое окружение, оно сразу же будет казаться серым.

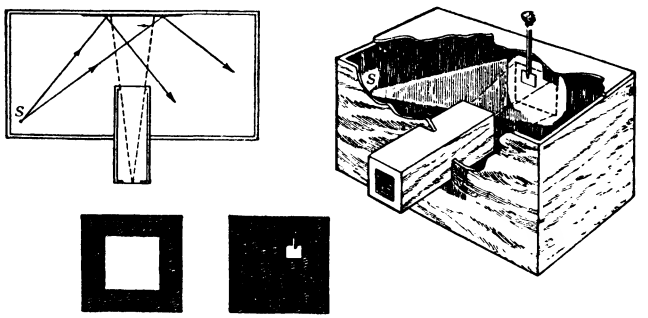
Эксперименты показывают, что «серый»— это название, которое мы даем ощущению меньшей *относительной* светлоты. Фактически такой же эффект наблюдается, когда свет воспринимается как цветной, и появление серого в пятне цветного света, окруженного более светлой полосой того же цвета, столь же заметно, как и в том случае, если оба излучения нецветные.

С другой стороны, белое и черное — различные восприятия, такие же самостоятельные, как серое. Белое соответствует восприятию поверхности с высоким отражением (обычно от 75 до 100%), освещенной достаточно интенсивно для того, чтобы поверхность была видна как белая. Черное — восприятие, которое возникает в том случае, когда свет, идущий от данной поверхности, недостаточен для того, чтобы различать детали. Сам анализ показывает, что черное является таким же положительным восприятием, как и белое. На его восприятие подобным же образом воздействует присутствие поверхности, посылающей к глазу меньше света. Черное, имеющее не слишком малую интенсивность, будет видно как темно-серое, если вблизи для сравнения будет помещена поверхность, посылающая к глазу меньше света.

В гл. VIII была развита концепция «черной точки», согласно которой все яркости ниже некоторого уровня воспринимаются или кажутся черными. Там было указано также, что точный уровень, при котором возникает ощущение черного, зависит от фона, на котором рассматривается поверхность. Белое — это феномен, относящийся полностью к восприятию поверхности; серое— восприятие относительной светлоты поверхности, а черное — положительное восприятие недостаточности стимула для обеспечения должного уровня зрения.

Восприятие поверхности как белой не противоречит восприятию ее менее светлой по сравнению с другой белой поверхностью, освещенной сильнее. Однако то, что мы ее видим менее светлой, создает возможность видеть ее серой; анализ показывает, что при меньшей интенсивности света наблюдатель видит серый свет, идущий от белого щита.

Если сам щит не белый, а серый, то постоянство его кажущейся отражательной способности (т. е. белизны) становится гораздо меньшим, чем в том случае, если бы он был белым. Средне-серый становится значительно темнее в слабом свете, чем соответствующая поверхность в ярком свете. «Серость» *света* и серость *поверхности* начинают взаимодействовать по мере их увеличения. Темно-серый



Ф и г. 10.1. Прибор для демонстрации влияния белой поверхности в поле зрения на светлоту.

щит в конечном счете становится совсем темным по сравнению с тем же щитом при высоком уровне освещенности. Постоянство светлоты (или белизны), таким образом, в первую очередь определяется непосредственным восприятием отражательной способности. Оно значительно более эффективно для поверхностей, приближающихся к белым, и менее эффективно для поверхностей с малым отражением [1)].

Условия, при которых проявляется постоянство светлоты, исследовались неоднократно, в частности в работах [37, 51, 76, 28]. На основании этих работ можно сделать следующий вывод: эффект постоянства светлоты достигает своего максимума при наиболее обычных ситуациях. Опыт показывает, что при обычных (и особенно хорошо знакомых) условиях освещения наблюдатель имеет тенденцию видеть *поверхности* объектов и освещение этих объектов

[1)] Явление постоянства светлоты относится не только к яркостным восприятиям, но и к восприятию цветности и входит в общее явление константности зрения. Глаз при наблюдении предметов старается оценить их отражательную способность независимо от условий освещения, т. е. абстрагируясь от их действительной яркости и цветности. При наличии в поле зрения белой поверхности глаз как бы вносит поправку на белую поверхность и оценивает данную поверхность по сравнению с белой независимо от ее действительной цветности и яркости. Явление константности зрения тесно связано с явлением световой и цветовой адаптации и цветовым контрастом.— *Прим. ред.*

независимыми и реально существующими. Так, например, поверхность листа белой бумаги, расположенного под настольной лампой, обычно не кажется нам имеющей переменную отражательную способность в зависимости от расстояния от лампы, а кажется неравномерно освещенной. Таким образом, *свет* виден меняющимся, а бумага воспринимается неизменной и белой. Оба восприятия одинаково отчетливы.

Когда характер освещения становится необычным или неизвестным наблюдателю, то естественно, что теряется возможность воспринимать освещение, как таковое. При этих условиях восприятие отражательной способности (белизны) очень сильно искажается. В работе [20] приводится в качестве примера прибор (фиг. 10.1), в котором черная поверхность, освещенная на некотором участке мощным источником света, кажется белой с черным окружением. Однако она немедленно воспринимается как черная, если очень маленький кусочек белой бумаги будет помещен в пучок света.

Тени

Другой характерный случай, при котором хорошо заметны условия освещения, мы наблюдаем в случае, если от источника света на поверхность падает отчетливая тень. Если контраст освещения достаточно высок, легко заметить влияние условий наблюдения на восприятие. Они иллюстрированы на вклейке VII и названы в работе [72] «глядя на», «глядя в» и «глядя сквозь» тень. Наблюдатель может рассматривать освещение в целом; в этом случае тень кажется относительно темной областью в поле зрения: он может внимательно рассматривать объекты в пределах тени и разглядывать их детали или же может настолько сконцентрировать свое внимание на деталях, что не будет замечать того факта, что эти детали находятся в тени. В двух последних случаях постоянство светлоты достаточно полное.

Желательно сделать попытку описать эффект постоянства светлоты. В частности, необходимо, чтобы читатель имел представление о примерной природе явления и о степени, с которой это явление изменяется от индивидуума к индивидууму или с изменением условий. Из уже обсуждавшихся ранее фактов следует, что условия наблюдения сильно влияют на эффект постоянства светлоты. Экспериментально также было найдено, что степень действия этого эффекта зависит от наличия этих условий [9, 76].

Возможны два крайних типа восприятия: восприятие света, как такового (т. е. яркости), и восприятие отражательной способности поверхности. Предположим, что имеются две поверхности: A — с отражательной способностью 80% и B — с отражательной способностью 20%. Предположим также, что поверхность B имеет

достаточно высокую освещенность и что некоторому наблюдателю она кажется одинаковой с поверхностью A по светлоте в том случае, если поверхность A находится при освещенности, равной 1/8 освещенности поверхности B. Если бы не действовало явление постоянства светлоты, поверхность B имела бы отражательную способность, равную 1/8 отражательной способности поверхности A, или 10%. Если учесть все эти данные, то для поверхностей получим следующее отношение:

$$\frac{20\% - 10\%}{80\% - 10\%} = \frac{10\%}{70\%} = 0{,}143,$$

называемое отношением Брансуика; оно всегда находится в пределах между 0 и 1. Если в приведенном выше примере наблюдатель решил бы, что две поверхности уравниваются в том случае, если освещенность поверхности A равна $^1/_4$ освещенности поверхности B, то отношение Брансуика было бы равно

$$\frac{20 - 20}{80 - 20} = 0.$$

С другой стороны, если никакая комбинация освещенностей не приводит к равенству и дальнейшее экспериментирование показывает, что если поверхность B изменить таким образом, чтобы она имела отражательную способность 80%, то равенство может быть получено даже в том случае, когда освещенности изменяются как 8 : 1, и отношение Брансуика принимает следующий вид:

$$\frac{80 - 10}{80 - 10} = \frac{70}{70} = 1.$$

Тот факт, что при действительных наблюдениях не достигается ни один из этих пределов, указывает, что эффект постоянства светлоты, наблюдаемый применительно к поверхностям, находящимся при различном освещении, является компромиссом между идентификацией «светлоты» поверхности с ее действительной яркостью и с ее действительной отражательной способностью.

Отношение Брансуика имеет тот недостаток, что его изменения не пропорциональны действительным изменениям степеней восприятия, и по этой причине те же самые значения отношения для двух различных случаев восприятия не имеют одинакового смысла. Более близкое приближение для оценки равных визуальных различий дает отношение Таулесса, которое базируется на логарифмах отражательной способности. Используя тот же самый пример, что и приведенный выше, получаем отношение Таулесса

$$\frac{\lg 20 - \lg 10}{\lg 80 - \lg 10} = \frac{1{,}301 - 1{,}000}{1{,}903 - 1{,}000} = \frac{0{,}301}{0{,}903} = 0{,}33.$$

Слева. Если «глядеть на» тень, то тень видна как темная область с малым количеством видимых деталей.

Центр. В результате фиксирования внимания в пределах тени или глядя «в» нее мы обнаруживаем посветление тени, и детали в ее пределах становятся видимыми значительно яснее.

Справа. После приближения к тени и еще более сильного фиксирования внимания в ее пределах или «глядя сквозь» нее оказывается, что впечатление тени как таковой стремится исчезнуть.

Производя различные сравнения, глаз «работает» в большем соответствии с результатами, получаемыми по отношению Таулесса, чем с результатами, получаемыми по отношению Брансуика.

Экспериментально наблюдались следующие факты, подтверждающие правильность отношения Таулесса:

1. Различные условия наблюдения могут сдвинуть получаемое наблюдателем отношение практически от 0 (никакого постоянства светлоты) к величине, равной 1 (полное постоянство светлоты); инструктирование наблюдателя может даже создать восприятие, соответствующее величине, большей 1 (гиперкоррекция по отношению к различию освещенности).

2. Отдельные наблюдатели дают показания, лежащие в широком диапазоне значений, однако они могут быть разделены на две группы — группу наблюдателей, которые имеют тенденцию оценивать только яркость поверхности, и группу наблюдателей, которые вводят поправку на неодинаковую освещенность. Есть некоторые указания, позволяющие считать, что неопытные наблюдатели (включая детей) обычно относятся к первой группе, а художники или тренированные наблюдатели — ко второй.

3. Инструктирование наблюдателя с целью акцентировать его внимание либо на отражательной способности, либо на яркости может в некоторых случаях изменить отношение в интервале, который для одних наблюдателей значительно больше, чем для других. Некоторые наблюдатели не могут получать иного типа восприятия, кроме восприятия отражательной способности.

4. Существует небольшое количество наблюдателей и такие условия, при которых отношение достигает или 0, или 1. Другими словами, даже сознательная попытка тренированного наблюдателя видеть один или другой крайний случай почти всегда оказывается в этом отношении безуспешной.

5. Отношение оказывается наибольшим для поверхностей с высокой отражательной способностью и постепенно уменьшается по мере того, как уменьшается интенсивность освещения и отражательная способность. (В поддержку этого положения имеется гораздо меньше фактических данных, чем в отношении предыдущих четырех.)

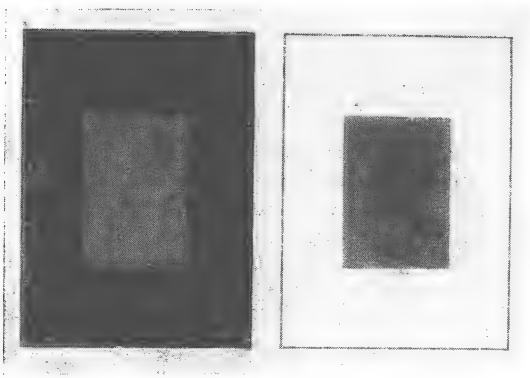
Если мы теперь вернемся к изложенной ранее терминологии, то станет возможным выразить все это несколько иначе. Переменными стимулами являются яркость и отражательная способность; психологическими переменными — светлота и белизна. В той степени, в какой позволяют условия и опытность наблюдателя, он может видеть или светлоту, или белизну как непосредственные восприятия.

Возможно, следует также указать, что в некоторых особых случаях совершенно равномерного освещения светлота и белизна ста-

новятся идентичными и эффект постоянства светлоты исчезает. Он может наблюдаться только в том случае, если освещение неравномерное, поскольку этот эффект может быть описан как прямая компенсация воспринимаемого градиента освещенности.

Одновременный контраст

Теперь можно рассмотреть соотношение между эффектом постоянства светлоты и хорошо известными эффектами одновременного контраста и сравнить их с эффектами световой адаптации, рассмотренными в гл. VII и VIII.



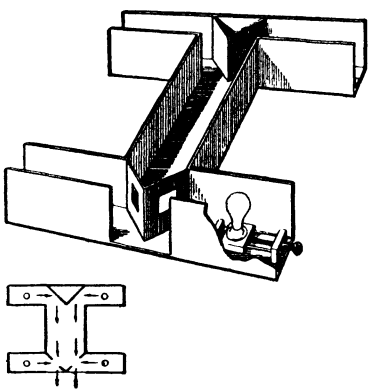
Фиг. 10.2. Два серых прямоугольника с одинаковой отражательной способностью, хотя прямоугольник, окруженный черным, виден как более светлый.

Одновременным контрастом можно назвать, например, эффект, вследствие которого поверхности или источники света любого вида кажутся более белыми (или светлыми) в случае, если они окружены темной поверхностью, по сравнению с тем, когда они окружены более светлой поверхностью. Этот эффект иллюстрируется фиг. 10.2, где две серые поверхности имеют одинаковую отражательную способность, хотя та из них, которая окружена черным, кажется более светлой.

Одновременный контраст для светлоты (подобный эффект существует и для цвета) является одним из основных эффектов. Если две поверхности поместить близко одна к другой, то разница в их светлоте увеличивается и эффект становится максимальным

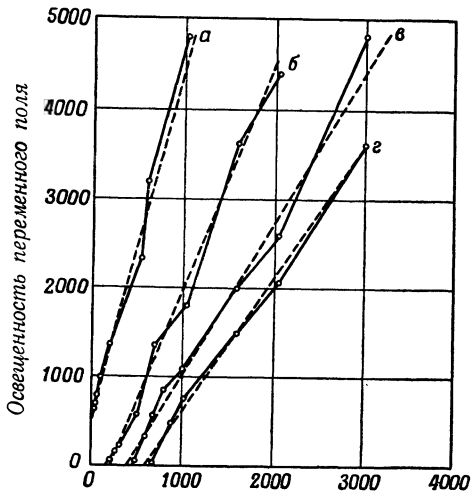
в случае, если сравнительно малая поверхность одного из них полностью окружена другой. Максимальный эффект получается и тогда, если одна из поверхностей наблюдается на черном фоне, а другая — на белом. Эффект в целом можно представить себе как некоторый механизм, который увеличивает малые различия в светлоте и делает их значительно более видимыми.

При изучении этого вопроса, кроме работы [29], выполненной в 1894 г., о которой упоминалось в гл. VIII, имеется мало работ



Ф и г. 10.3. Схема прибора Гесса и Претори.

Освещенности обеих поверхностей с одной стороны прибора поддерживаются постоянными. Освещенность передней поверхности с другой стороны прибора систематически меняется, и для каждой освещенности подбирается освещенность заднего поля таким образом, что оно кажется одинаковым с соответствующим полем с другой стороны.



Ф и г. 10.4. Часть результатов экспериментов Гесса и Претори.

Освещенности окружающего и центрального полей с той стороны, где они поддерживались постоянными, составляли соответственно: *а* — 512 и 10; *б* — 20 и 200; *в* — 10 и 512; *г* — 6,2 и 700 (в свечах Гефнера).

количественного характера. Результаты экспериментов авторов работы [29] позволяют связать эффект постоянства светлоты с адаптацией. Хотя выводы, к которым они пришли, должны быть подкреплены дальнейшей работой, однако мы их кратко здесь рассмотрим.

Гесс и Претори обнаружили, что при поле, разделенном на четыре части, которое они получали, используя прибор, показанный на фиг. 10.3, оказалось возможным воспроизвести полную серию условий, при которых поверхности, видимые через центральные отверстия, казались равной светлоты. Однако для того, чтобы

получить совпадающие результаты, оказалось необходимым ограничиться монокулярным зрением, фиксировать глаз на границу раздела между большими квадратами, проводить наблюдение только в течение определенного промежутка времени и стараться рассматривать площади как поверхности, лежащие в одной плоскости. Полученные авторами результаты приведены на фиг. 10.4. Они показывают, что если определенное отношение интенсивностей фиксируется с левой стороны, то светлота центральной площадки правого квадрата может уравниваться с центральной площадкой левого квадрата для всего диапазона яркостей внешнего поля. Если фон черный, то для освещения центра требуется минимальная интенсивность. По мере того как интенсивность правого внешнего поля возрастает, оказывается необходимым увеличивать интенсивность центра с тем, чтобы сохранить равенство с центральной площадкой левого поля. Требуемая интенсивность освещения центра оказалась находящейся в линейной зависимости от освещенности внешнего поля.

Ввиду большой важности таких исследований автор построил небольшую модель прибора Гесса и Претори, с тем чтобы посмотреть, какое влияние на результаты будет иметь изменение тенденции наблюдателя. Оказалось возможным на сравнительно грубом оборудовании подтвердить результаты работы предыдущих исследователей. Особенно отчетливо выявился следующий факт. Как только различие в светлоте между двумя окружениями становится очень большим, для получения воспроизводимых результатов *приходится* проводить наблюдения с некоторой тенденциозностью. При больших различиях внутренние квадраты казались флуктуирующими и наблюдателю было трудно уравнивать светлоты в относительно широком интервале интенсивностей. Бинокулярным зрением пользовались в помещении, которое не было полностью затенено. При этих условиях было вполне отчетливо видно, что имеются четыре видимые поверхности, и оказалось возможным просить наблюдателя оценить их внешний вид одним из двух различных способов. Все в целом может рассматриваться как куб, наблюдаемый с одного из углов, у которого на каждой из двух граней имеются серые квадраты или вместо серых квадратов можно видеть два отверстия, через которые наблюдается единая, независимо освещаемая поверхность. Результаты, получаемые в случае, если наблюдатель рассматривает картину как одну из двух вышеописанных, оказались вполне удовлетворительными. Сразу же исчезла неопределенность. Если воспринимался куб с серыми квадратами, равенство сдвигалось в сторону отношений, требуемых при полном постоянстве светлоты. Когда воспринималась равномерно освещенная, лежащая сзади поверхность, видимая через два отверстия, результаты сдвигались в сторону равных яркостей с двух сторон.

Эти восприятия в точности соответствуют двум обсуждавшимся выше ситуациям, при которых внимание может быть соответственно направлено на отражательную способность (белизну) или на яркость (светлоту). По мере развития экспериментов становилось ясным, что обычное постоянство светлоты идентично с одновременным контрастом и что эффект может быть в значительной степени скомпенсирован, если внимание будет сосредоточено исключительно на интенсивности стимула. Эксперименты наглядно показали различие в способе наблюдения в этих двух случаях: наблюдатель или фиксировал границу раздела *между* квадратами в поисках постоянства светлоты, или быстро переводил взгляд с центра одного квадрата на другой для восприятия действительной интенсивности стимулов. Это различие показывает, что то, что описывалось ранее как различие в тенденции наблюдателя, может рассматриваться как различие в первую очередь в способе наблюдения, а не в психологии наблюдения. Таким образом, можно сделать вывод, что эффект является чисто психофизическим.

Такое сведéние к психофизике может также связать описанные эффекты с законами адаптации. В гл. VIII уже указывалось, что глаз легче и быстрее адаптируется к новому уровню интенсивности, если этот уровень светлее того, к которому глаз уже привык. Если новый уровень ниже, то требуется некоторое дополнительное время, продолжительность которого зависит от периода времени, в течение которого наблюдалась предыдущая интенсивность, а также от величины этой интенсивности. Было указано также, что этот эффект возникает не только для всего поля зрения, но и для отдельных его участков. Оба эффекта постоянства светлоты и одновременного контраста можно объяснить на основе этого свойства глаза, но уменьшение эффекта вследствие тенденциозного наблюдения *стимула* уже невозможно объяснить без привлечения некоторого, далеко идущего постулата. Рассмотрим сначала объяснение, а затем выскажем некоторые предположения.

Если, перемещаясь от освещенной части сцены к затемненной, глаз будет адаптирован полностью к превалирующему уровню светлоты, можно ожидать, что поверхности с одинаковой относительной отражательной способностью будут в двух частях поля видны одинаковыми. Это условие постоянства светлоты. Если наблюдение большого прямоугольника, окружающего меньший, вызывает адаптацию к более светлой окружающей площади, можно ожидать, что центр будет казаться более темным, чем если тот же самый центральный участок был бы наиболее светлой частью в поле зрения, как в случае, если бы он был окружен черным. Эти объяснения кажутся логичными и, вероятно, в значительной степени применимы для объяснения описанных выше примеров. Ослабление этих эффектов вследствие изменения психической тенденции наблюдателя требует

психологического контроля процесса адаптации. Автору это кажется достаточно доказательным, чтобы поддержать подобный постулат. Вспомним, что с детства мы использовали наше зрение таким образом, чтобы получать сведения о природе объектов, *несмотря* на различные ситуации, в которых они нам встречались. Не будет удивительным, если эти необычные способы использования зрения могут создать описанные результаты. Если это так, то в обоих крайних случаях мы сталкивались только с прямым ответом глаза, на который воздействовала адаптация, и вопрос в целом может быть сведен в психофизическую плоскость.

Каким бы ни было действительное объяснение, факты показывают, что постоянство светлоты, одновременный контраст и световая адаптация являются тесно связанными эффектами, существующими в одно и то же время независимо от того, как производится эксперимент, и что, возможно, все они являются одним и тем же явлением, но рассматриваемым с разных точек зрения.

Возможно (в качестве последнего примера), три описанных выше способа наблюдения теней могут помочь подытожить рассмотрение вопроса. Руд [68] указывал, что наблюдатель может смотреть «на» «в» или «сквозь» тень. Эти три способа могут быть рассмотрены следующим образом. Если наблюдатель интересуется объектом как целым и в особенности освещением объекта, тень становится частью освещения. Она видна просто как более темная поверхность некоторой геометрической формы. В зависимости от внимания, которое на нее направлено, ее восприятие может меняться от восприятия части пространства, оказывающейся темнее пространства вокруг нее, до восприятия (в другом крайнем случае) простого темного пятна на объекте. Обо всех этих случаях можно сказать, что наблюдатель смотрит *на* тень. Адаптация создается объектом как целым, и отдельные характеристики поверхностей, находящихся в тени, не замечаются.

Предположим теперь, что наблюдатель хочет внимательно рассмотреть некоторые объекты, лежащие в тени. Он смотрит на них, фиксируя глазом область тени; возможно, что он также немного сощуривает глаза и затеняет их от остальной части объекта. Все эти действия повышают чувствительность глаза, и новый уровень адаптации обеспечивает лучшее зрение в тени. В этом случае наблюдатель смотрит *в* тень и рассматривает поверхности при этом освещении.

Если он приближается к тени и ограничивает свое внимание ее пределами, он больше не видит ее как тень, а видит как более или менее нормально освещенный объект, возможно, со светлым кольцом вокруг. Подходящим выражением для того, чтобы описать эту ситуацию, очевидно, является выражение «глядеть сквозь тень».

Четвертый случай, который может быть также назван «смотреть *сквозь*» или, возможно, «смотреть *через*» тень, мы наблюдаем, когда тень мала или в частном случае если она разбита на небольшие участки, как, например, тень, которую создают листья на белой стене дома или лучше на зеленой лужайке. Если наблюдатель интересуется стеной или лужайкой, он видит их как непрерывные поверхности с одинаковой отражательной способностью и не обращает внимания на затененные участки.

Факторы и характеристики внешнего вида объектов

До сих пор восприятие белизны и светлоты рассматривалось соответственно в связи с относительной отражательной способностью и интенсивностью света. Однако в повседневной жизни они имеют также и другой аспект. Они являются главными факторами, определяющими видимые *формы* объектов, на которых основываются наши сведения о характеристиках поверхности объектов. Эти восприятия являются скорее прямыми, чем вторичными, т. е. объект виден как сферический и имеющий тусклую поверхность непосредственно, а не путем дедукции с учетом условий освещения. Они настолько важны, что получили в физиологии специальное название и классифицируются как факторы, определяющие восприятие внешнего вида объектов. Эта классификация была использована в докладе Комитета по колориметрии; часть данных из доклада, относящихся к этому вопросу, приведена в виде табл. 10.1.

Таблица 10.1

Классификация факторов и характеристик, определяющих восприятие внешнего вида объектов

Факторы внешнего вида	Характеристики внешнего вида
Апертура (1—5)	1. Светлота (или белизна)
Источник света (1—8)	2. Цветовой тон
Освещенность (1—3)	3. Насыщенность
Поверхность (1—11)	4. Размер
Объем (1—9)	5. Форма
	6. Расположение
	7. Мелькание
	8. Сверкание
	9. Прозрачность
	10. Глянец
	11. Блеск

Необходимо понять важность разделения, которое сделано в этой таблице между «факторами внешнего вида» (modes of appearance) и «характеристиками внешнего вида» (attribute of modes of appearance). Первые четыре понятия соответствуют в общем тому, что уже было нами описано как типы восприятия, контролируемого отношением наблюдателя. Фактор «апертура» соответствует, грубо говоря, восприятию качества света, идущего от любой поверхности и рассматриваемого как *свет* безотносительно к его источнику. Факторы «осветитель» и «освещение» соответствуют восприятию освещения независимо от характеристик отражающих поверхностей, т. е. света, падающего на поверхность, в отличие от отраженного света. Два фактора, относящихся к «объекту»—«поверхность» и «объем»,— соответствуют восприятию *характеристик объектов* независимо от освещения. Основные различия, наблюдаемые в этих случаях, уже обсуждались для светлоты и будут рассмотрены для цветовых восприятий в следующей главе.

Характеристики восприятия внешнего вида представляют собой переменные восприятия, которые могут быть различны в разных случаях. Номер в скобках после каждого фактора указывает соответствующие характеристики. Так, «апертура» может иметь переменные характеристики от 1 до 5 и т. д.

Очевидно, что не все характеристики относятся к цвету в обычном смысле этого слова и что большинство людей ограничивается первыми тремя характеристиками. Тем не менее верно, что эти переменные восприятия настолько сильно влияют на наши нормальные реакции, что становится очень трудным даже при наилучших условиях сделать удовлетворительное сравнение для первых трех характеристик, если другие характеристики не сравниваются. Например, исключительно трудно для среднего наблюдателя сказать, что цвет гладкого куска цветной бумаги, практически не имеющего фактуры, такой же, как и цвет куска шерстяной ткани грубого плетения или куска блестящего вискозного шелка. Еще труднее произвести такое сравнение, когда характеристики внешнего вида различны, например когда цвет источника света сравнивается с цветом отражающей поверхности. Многие считают, что подобное сравнение часто вообще невозможно.

Восприятие размера, формы и положения объекта или участка сцены зависит от многих психологических переменных, некоторые из которых рассматривались в гл. IX. В соответствии с принятой точкой зрения они являются восприятиями, зависящими от геометрического распределения светлоты на сцене и, в частности, градиента светлоты на границе двух соприкасающихся участков. В некотором смысле они определяются чистой геометрией изображения в глазу. В действительности, однако, на восприятие светлоты, так же как и на восприятие белизны, могут оказывать замет-

ное влияние условия восприятия этих переменных. Например, объект, видимый издалека сквозь дымку, может казаться имеющим совершенно другую белизну, чем при наблюдении его сквозь чистый воздух. Таким образом, для всех характеристик справедливо, что, хотя восприятия вызываются физическими стимулами, это не значит, что они полностью *определяются* физическими условиями. *Психологический результат данной ситуации* (*т. е. ее вид для наблюдателя*) *меняется по всем характеристикам, когда восприятие какого-либо одного из них меняется вследствие изменения внимания наблюдателя.* Следовательно, *ни одна* из характеристик не может рассматриваться независимо от всех остальных, и все они должны приниматься во внимание, когда делается какая-либо попытка предсказать восприятие наблюдателя.

Эта особенность восприятия значительно затрудняет изложение вопроса о цвете. Когда условия контролируются таким образом, что все характеристики, кроме одной, для двух сцен одинаковые и они обе воспринимаются одинаково, сравнение становится довольно простым и могут быть получены результаты высокой точности. Как только две характеристики начинают различаться, становится трудным иметь относительное суждение о каждой из них, а как только все они начинают меняться или становятся различными, даже специалисты могут давать только грубые оценки.

Очевидно, что характеристики 7 и 8 (см. табл. 10.1) — мелькание и сверкание — представляют собой изменение интенсивности и, возможно, качества света с течением времени. Они соответствуют восприятию переменного света.

Характеристика 9 — прозрачность — совершенно отлична по природе и соответствует восприятию света в том случае, если он достигает глаза после прохождения через какое-то вещество, а не после отражения от его поверхности.

Характеристика 10 — глянец — относится к тому случаю восприятия, когда поверхность объекта хорошо отполирована и, следовательно, может отражать свет зеркально без селективного поглощения.

Характеристика 11 — блеск — соответствует восприятию поверхности, характеристики которой меняются с изменением угла зрения настолько быстро, что два глаза наблюдателя фиксируют различные интенсивности или качество света. Часто эквивалент блеска получается и с помощью фотографии, если правильно воспроизводится градиент отраженного излучения источника света.

Очевидно, что все эти обсуждения могут только смутить человека, впервые столкнувшегося с изучением цвета. Однако это именно те эффекты, которые вызывали значительные расхождения в мнениях разных исследователей. После ознакомления с упрощенным объяснением понятий светлоты, цветового тона и насыщен-

ности кажется естественным ожидать, что будет несложно создать наглядную систему, отражающую все эти переменные, и затем определить в этой системе все цвета, охарактеризовав их некоторыми числами. Было создано много таких систем, и некоторые из них будут рассмотрены сравнительно подробно в гл. XII. Однако, когда делают попытку воспользоваться одной из этих систем, обнаруживается, например, что светлоту куска бумаги нельзя просто сравнить с светлотой источника света. Как будет показано, необходимо использовать различные системы с соответствующими характеристиками, разными при различных условиях наблюдения.

Эту главу можно закончить двумя примерами, подчеркивающими взаимосвязь различных характеристик восприятия. При восприятии объекта, находящегося под известным осветителем, например под солнцем или лампой, изменение интенсивности, вызываемое формой поверхности, воспринимается непосредственно как *форма*, а не как изменение интенсивности. Это восприятие обычно настолько сильно, что для нетренированного наблюдателя почти невозможно вообще увидеть «затенение» объекта. И все же это то затенение, которое художник должен видеть или знающий фотограф должен сознательно воспроизвести, если он хочет создать ощущение формы у человека, рассматривающего изображение.

Кроме того, контраст определяется геометрией того пути, который проходит свет, достигая видимых объектов. В солнечном свете контраст определяется облачностью на небе, близостью отражающих объектов и т. п., поскольку эти условия определяют количество света, которое попадает в область теней. При искусственном свете контраст определяется количеством источников света и отражением. Однако снова контраст определяется главным образом количеством света, попадающего в область теней. В яркий безоблачный день вне помещения далеко от вертикальных поверхностей, например стен домов, этот контраст может достигать очень высоких значений. В обычной речи такие условия описываются как «яркий» солнечный свет, и это слово передает ощущение интенсивности, которое создается у наблюдателя, видящего эту сцену. Было найдено, однако, что почти такое же ощущение интенсивности создает любая сцена, освещенная до того же самого *контраста* даже тогда, когда действительная интенсивность значительно ниже. Восприятие светлоты освещения определяется, таким образом, размером, формой и расположением источников света в большей степени, чем их физическими интенсивностями, как таковыми.

ГЛАВА XI

Восприятие цвета

Слово «цвет», как его применяют в обычной речи и в этой книге, может иметь различные значения. Каждое его значение ассоциируется с одной или несколькими сторонами вопроса, и в каждом конкретном случае можно подразумевать любое из его значений в зависимости от того, в каком отношении в данный момент рассматривается явление. В этой главе мы исследуем цвет с точки зрения психологии, т. е. как мы воспринимаем цвет и какие параметры влияют на его восприятие.

Природа цвета

Специалисты по цвету, практики и экспериментаторы, встречаются с двумя на первый взгляд не связанными фактами. Цвет, как мы его видим, весьма непостоянное явление, зависящее в широких пределах от отношения этого цвета ко всем другим, одновременно воспринимаемым цветам. Нельзя считать, что цвет строго определяется стимулом (возбудителем), порождающим его непосредственно. С другой стороны, свойства поверхности, вызывающие цвет, кажутся достаточно постоянными при широких вариациях цвета освещения; обычно (однако не всегда) цвет поверхности кажется почти одинаковым при дневном и искусственном свете. Оба эти явления вызваны в значительной степени цветовой адаптацией, о которой уже говорилось выше.

Когда глаз фиксирован на некотором цветном объекте, то происходит мгновенное изменение цветовой чувствительности соответствующего участка сетчатки глаза. Эта цветовая адаптация не оказывает мгновенного влияния на воспринимаемый цвет, но изменяет восприятие объекта, на который впоследствии перемещается взгляд. Чем больше время наблюдения, выше интенсивность и больше размер участка, тем значительнее этот эффект. Как было установлено [86, 73], можно принять в первом приближении, что мгновенная полная адаптация имеет место лишь в том случае, когда яркость источника, вызывающего адаптацию, относительно велика и когда глаз непосредственно перед опытом находился в темноте. Как только стимул начинает действовать, эффект становится

более устойчивым в том смысле, что чувствительность глаза более длительно удерживается на низком уровне. В результате этого при переводе взгляда на участок с более низкой интенсивностью снижение чувствительности, вызванное первым участком, сохраняется и выявляется в виде «последовательного образа», наложенного на второй. Этот эффект имеет место не только на участке изображения объекта, вызывая локальную адаптацию, но и распространяется с падающей силой на соседние области, вызывая «побочную адаптацию»[1]. Кроме того, из-за устойчивости этого эффекта адаптация будет стремиться к единой для всего глаза, если взгляд будет перемещаться по всем объектам и если яркость объектов примерно равна или их цвета мало отличаются. Ниже явления, связанные с локальной, побочной и общей адаптацией, будут рассмотрены применительно к восприятию цвета.

Рассмотрим сначала случай простого цветного «последовательного образа». На вклейке VIII изображены цветной пятиугольник и кольцо, расположенные внутри черного поля. Если при сильном освещении напряженно смотреть в течение 20—30 *сек* на крошечную точку в центре одной из фигур и затем перевести взгляд на черную точку в центре верхнего левого серого поля, то вокруг этой точки появится пурпурный участок. Эффект накапливается и нарастает при многократном переводе взгляда с одной точки на другую. Такая простая локальная адаптация может быть объяснена следующим образом. Исходим из положения, что в глазу имеются три приемника, реагирующих раздельно преимущественно на красный, зеленый и синий свет; возбуждение зеленым светом вызывает утомление ощущающего приемника, уменьшая чувствительность глаза к зеленому. Так как рисунок не отражает значительного количества синего и красного, то соответствующие им два приемника приобретают гораздо более высокую чувствительность. При наблюдении серого поля, которое можно рассматривать примерно как одинаковый возбудитель для всех трех приемников, действие на синий и красный приемники предварительно адаптированного глаза будет больше, чем на зеленый, и на сером фоне появляется пурпурное изображение. Справедливость этого объяснения подтверждается другими окрашенными полями на вклейке VIII. При адаптации на зеленую фигуру и наблюдении желтого поля в этом случае мы обнаруживаем красное «послеизображение», которое вызвано тем, что желтое поле не отражает синего, а так как чувствительность глаза к зеленому мала, то результирующим цветом будет красный. Соответствующее изменение цвета «последовательного образа» имеет место и при использовании красного и сине-зеленого полей.

[1] Эту форму адаптации часто называют также «индуктивной».— *Прим. ред.*

Возникновение последовательных образов или локальной адаптации можно продемонстрировать следующим экспериментом. Если продолжительное время смотреть на ярко освещенную поверхность и затем перевести взгляд на отдаленную, слабо освещенную стену, то можно вызвать более четкий последовательный образ, чем в первом случае; но, так как при этом размер изображения на сетчатке глаза не изменяется, мы теперь воспринимаем этот последовательный образ резко увеличенным по сравнению с его первичным размером. Таким методом можно определить дальность объекта, оценив отношение размеров двух изображений.

Процесс адаптации, распространяющийся также на прилегающие участки глаза, может быть назван побочной адаптацией. Этот эффект иллюстрирован на вклейке IX. Здесь изображены четыре сосуда одинакового зеленого цвета, если их рассматривать каждый в отдельности. Но при рассмотрении их совместно с цветом соответствующих фонов они воспринимаются по-разному по всем трем параметрам: цветовому тону, светлоте и насыщенности. Простой анализ показывает, что здесь имеет место тот же эффект, что и на предыдущей вклейке, с той лишь разницей, что процесс происходит скорее одновременно, чем последовательно, и в тех участках, на которые непосредственно не воздействовал возбудитель. Побочная адаптация распространяется от периферии к центру и вызывает так называемый одновременный цветовой контраст [5][1]).

Состояние общей адаптации цветового зрения вызывается длительным наблюдением поверхностей, освещенных светом одинакового цвета. Если эти поверхности сами по себе не обладают слишком высокой селективностью, то возникает такая перестройка трех приемников глаза, которая частично компенсирует изменение спектрального распределения энергии источника по сравнению с белым светом. Если представить себе эти три приемника в виде трех фотоэлементов, чувствительных в синей, красной и зеленой зонах соответственно, то становится возможным построить простую аналогию, облегчающую понимание этого явления. Предположим, что при дневном освещении три фототока от белой поверхности равны и свет виден как белый. Общая адаптация означает, что при любом объекте наблюдения и любом освещении три приемника перестраиваются так, чтобы сохранить в первом приближении равенство трех фототоков для интегрального света, отраженного поверхностью, который, таким образом, покажется также белым. Как было уже сказано выше (гл. VIII), в результате этой перестройки, кроме того, имеется тенденция к исправлению всех цветов соответственно

[1]) Явление одновременного цветового контраста значительно более сложно, чем думает автор, и его объяснение не может быть целиком сведено к процессу адаптации зрения.— *Прим. ред.*

их виду при дневном свете. Однако этот эффект имеет лишь приближенный характер. Перестройка может быть для одного цвета лучшей, чем для других. При явно цветном освещении имеет место неполная коррекция цвета, а иногда возникает просто искажение цвета, как, например, при эффекте Хелсона — Джадда, который преобразует черный цвет в цвет, дополнительный к цвету освещения.

Дополнительно к этим достаточно хорошо изученным явлениям адаптации было найдено, что при изменении процентного содержания белого в каком-либо возбудителе меняется и воспринимаемый цветовой тон, а при изменении только интенсивности меняется также насыщенность. Обобщая, можно установить, что не существует простого физического параметра, по которому можно было бы варьировать интенсивность или другие качества света, не вызывая изменений ощущений: цветового тона, насыщенности и светлоты.

Мы привели этот обзор для того, чтобы подчеркнуть сложность взаимосвязи между физическими свойствами стимула, вызывающего ощущение цвета, и воспринимаемым цветом. Несмотря на эту сложность, в некоторых простых случаях имеется возможность рассчитать цвет. Однако при попытке осуществить такие расчеты мы встречаемся с трудностями, подобными тем, которые имели место при расчете относительной светлоты. В этом случае мы нашли возможным рассчитать психофизическое значение так называемой яркости [6], которое, однако, соответствует «психологической яркости», т. е. светлоте только при особых обстоятельствах. Точно таким же образом можно рассчитать цветность какой-либо поверхности при данном освещении. Эта цветность полностью определяет «колориметрическую чистоту» и доминирующую длину волны света, как его воспринимал бы стандартный наблюдатель в установленных условиях. (Основа и практика таких расчетов будут рассмотрены в гл. XII.) Так же как яркость представляет собой расчетную эффективную интенсивность относительно чувствительности стандартного глаза, так и цветность дает два других параметра, описывающих цвет искомого света.

Постоянство цвета поверхностей

Явление, называемое постоянством цвета или константностью цвета, заключается в приближенном сохранении восприятия цвета предмета при изменении цвета освещения. Причина этого явления заключается отчасти в общей адаптации, которую мы уже рассмотрели. Однако для этой стороны эффекта скорее можно найти параллель в адаптации по общему уровню интенсивности, чем в описанном выше явлении постоянства светлоты. К явлению постоянства светлоты можно найти параллели в эффектах, которые имеют

место при зрительном восприятии неравномерно освещенной окрашенной поверхности. Этот вопрос имеет известное значение для художника и обычно рассматривается как вопрос о цвете теней.

Можно попытаться объяснить это явление, но следует учесть, что при более подробном анализе наши объяснения окажутся неточными. Было установлено, что и цветовой тон, и насыщенность изменяются одновременно с изменением интенсивности света. Однако свет от однородной поверхности при неравномерном освещении варьируется только по интенсивности и ни по каким другим качествам. Хорошо тренированный наблюдатель стремится *обнаружить* каждое из этих качеств. Если его *внимание* сконцентрировано на цвете *излучения*, достигающего глаз, то его восприятие будет направлено на обнаружение сдвига цветового тона, которым сопровождается заниженная интенсивность в тенях. Если же он *рассматривает цвет самой поверхности*, то стремится воспринять свет от поверхности постоянным независимо от вариаций интенсивности. В первом случае зрительное отношение направлено на восприятие цветности, во втором — на селективное действие поверхности; первый случай аналогичен светлоте, а второй — белизне.

Влияние целенаправленности наблюдателя

Рассматривая вопрос восприятия с психологической точки зрения, надо отметить, что один и тот же объект может восприниматься весьма различно в зависимости от целенаправленности наблюдателя. Предположим, что желтый объект на сером фоне освещается источником искусственного света достаточной интенсивности (например, 100-ваттной лампой накаливания). Если наблюдатель сознает, что свет желтоватый относительно дневного освещения, тогда, наблюдая с такой направленностью, он воспринимает свет от фона как желтый. Если же он затем длительное время наблюдает объект, переводя взгляд по всей его поверхности, то достигает общей адаптации к желтому цвету, значительно превышающей адаптацию, вызванную светом от фона. Фон в этих условиях будет казаться синеватым. Такие опыты несколько сложны для желтого цвета, но более просты для других. Предположим теперь, что наблюдатель внимательно смотрит на фон с целью определения истинного цвета его поверхности. Пока ему удается поддерживать это зрительное отношение, он видит цвет поверхности близким к нейтрально-серому.

Затем наблюдатель обращает свое внимание на желтый объект, в частности на его освещенную сторону. Сравнивая мысленно цвет объекта с его цветом при дневном освещении, который наблюдатель помнит, он, вероятно, увидит несколько менее насыщенное желтое, поскольку его глаз адаптирован к желтому цвету. Длительное

наблюдение одной желтой поверхности еще более увеличивает локальную адаптацию к дневному свету и еще больше уменьшает насыщенность желтого цвета. При переводе взгляда на слабо освещенную часть фона временно возникает синее «послеизображение» объекта.

Предположим, что наблюдатель теперь заинтересуется теневой стороной объекта. Если он наблюдает за светом, исходящим от этой части, то он видит ее явно зеленой по сравнению с цветом освещенной стороны объекта, особенно если желтый цвет объекта очень чистый и скорее зеленоватый, нежели оранжеватый. Так, желтое вызывает сдвиг к зеленому при уменьшении интенсивности освещения. Если же наблюдатель пытается определить цвет самого объекта, то он увидит то же желтое без заметного сдвига цветового тона. И если, наконец, на наблюдаемом объекте появляется тень от скрытого предмета, причем так, чтобы было незаметно, что это тень, наблюдатель может воспринять ее как зелено-желтое пятно. Предыдущий случай объясняется целенаправленностью наблюдателя. Последний пример есть иллюзия (и весьма убедительная, если условия наблюдения выполнены строго). Аналогичные иллюзии могут иметь место, когда окрашенный объект отражает свет в тени и в других часто встречаемых подобных случаях. Иллюзия исчезает, как только обстоятельства позволят наблюдателю понять всю наблюдаемую обстановку и направить свои усилия на соответствующее восприятие.

Приведенные примеры были выбраны так, чтобы исключить явления, вызываемые локальной и побочной адаптацией, хотя локальная адаптация была упомянута. Возникновение возможных сдвигов по цветовому тону, вызванное этими двумя видами адаптации, еще увеличивает число цветностей, которые можно было предопределить, учитывая уровень адаптации для всех возможных уровней интенсивности света каждого объекта и различную последовательность наблюдения, а также каждую пару примыкающих цветов. Читателю может показаться, что в этом месте мы пришли к абсурду, но это отнюдь не так. Все эти явления существуют, и их можно продемонстрировать достаточно точно. Мы хотели лишь подтвердить ранее высказанную точку зрения, что исследования в этой области крайне сложны из-за большого числа переменных и разнообразия условий.

Некоторые случаи, встречавшиеся ранее, ниже будут рассмотрены более подробно, а некоторые будут встречаться под различными заголовками в последующих главах. Для читателя из предыдущего изложения важно понять, какие процессы происходят, когда наблюдатель смотрит на объекты изолированно или с окружающей их обстановкой. Если наблюдатель интересуется только объектами, небрежно рассматривая ансамбль в целом, то он утверждает одно.

Если смотреть, не отрывая взгляда, на точку внутри диска или пятиугольника и затем перевести взгляд на другую поверхность, то будет виден последовательный образ. На серой поверхности последовательный образ имеет цвет, дополнительный к цвету исходной поверхности. На других поверхностях он имеет цвет субтрактивной смеси этого дополнительного цвета и цвета поверхности, на которой он наблюдается.

Влияние цвета окружения на видимый цвет любого объекта

На одном фоне цвет всех сосудов будет совершенно одинаковым. На верхнем правом рисунке цвет сосуда кажется более светлым и менее насыщенным; на нижнем левом светлота сосуда средняя по сравнению с двумя верхними, однако сосуд более синеватый. На нижнем правом он средний во всех отношениях.

Степень адаптации человеческого глаза удивительно высока. Если оба изображения изолированы и освещены дневным светом, то цветовой баланс верхнего при адаптации глаза к дневному свету будет совпадать с цветовым балансом нижнего при адаптации глаза к свету обычной лампы накаливания.

«Spreading эффект» Ван Бецольда

В этих узорах окрашенные участки не перекрываются, они состоят только из трех цветов: красного, синего и черного плюс белый цвет самой бумаги. Зрительное проявление любого красного и синего участков зависит в известной мере от прилегающих участков. Синие участки, обведенные черным, кажутся темнее и насыщеннее тех, которые обведены белым, и отличаются по цветовому тону от тех, которые окружены красным. Сдвиги по яркости противоположны сдвигам, вызванным эффектом контраста. Это явление получило название «spreading эффект» [10].

Опытный художник видит совсем по-другому; он видит цвет объекта или цвет света, исходящего от объекта, в зависимости от того, что его интересует. Если наблюдатель крайне внимательный и если ему предложить определить цвет объекта, то он может дать совсем другой ответ, потому что он сумел бы достаточно тщательно обобщить все эффекты, для того чтобы прийти к выводу о цвете.

Данный обзор охватывает далеко не все, что можно сказать по этому вопросу, по которому можно было бы написать объемистую книгу. То, что было сказано, например, о сдвигах цветового тона в тенях, справедливо также для сдвигов цветового тона при изменении насыщенности. Такие явления встречаются, когда белый свет виден в отражении от полированной окрашенной поверхности. И в этом случае свет может быть виден со сдвигом или без сдвига цветового тона.

Эмоциональная реакция на цвет

Другой вид восприятия, имеющий большое значение в повседневной жизни, заключается в не слишком ясном до сих пор взаимодействии между цветом и эмоциональной или психической реакцией, вызванной этим цветом. Эта сторона цвета, хотя и не входит в рассматриваемый здесь комплекс вопросов, имеет значение, когда восприятие приводит скорее к определенному состоянию, чем к оценке самого цвета, который, как таковой, в этом случае не проявляется. Примером такого восприятия может служить понятие о теплых и холодных цветах. Для среднего наблюдателя справедливо называть теплыми все цвета от чисто-желтого, оранжевого, красного, до красно-пурпурного, а холодными — все цвета от зеленоватого, зелено-голубого, синего до сине-пурпурного (хотя эта граница и весьма условна). Кажется почти невозможным обосновать такие ощущения, с которыми охотно соглашаются почти все наблюдатели; обоснование для такого разделения, вероятно, заложено очень глубоко в человеческом опыте. Существуют различные объяснения этого вопроса, сводящиеся к проведению аналогии с цветом холодных и горячих предметов. Автор этой книги может предложить другое объяснение, основанное на том, что цвет, преобладающий в естественном освещении холодных дней,— синий, в то время как солнечный свет — желтоватый. В северных широтах в зимнее время, когда солнце низко над горизонтом, при густом тумане или сплошной облачности общее освещение значительно более синее, чем в ясные солнечные летние дни, когда солнце высоко. Известно также, что впечатление холодного или теплого дня на фотографиях и в живописи создается сдвигом общего цветового тона к синему или к желтому соответственно.

Важное значение имеет также то обстоятельство, что в условиях, когда погода холодная и преобладают синие тона или теплая и пре-

обладают желтые тона, наблюдатель оценивает не цвета, а лишь температуру, хотя бы он и находился зимой в теплом доме, а летом в прохладной тени.

Неизвестно, какие явления возникают в иных условиях и до какого предела цвета могут восприниматься как эмоциональные реакции, а не как причины, вызывающие эту реакцию. Проводились некоторые исследования в этом направлении и найдены различные объяснения тому, что зеленый цвет успокаивает, а красный возбуждает. Насколько известно автору, не имеется никаких работ, которые бы установили, до какого предела такие реакции можно считать восприятиями.

Имеется также множество других не очень понятных эффектов, связанных с цветом, которые в настоящее время следует относить к области психологии восприятия, хотя вполне возможно и желательно, чтобы с развитием наших знаний в этой области их можно было рассматривать как психофизические процессы.

Эффекты распространения

Одно из малопонятных явлений более или менее детально было описано до 1900 г. фон Бецольдом [79] и Рудом [71] и затем часто упоминалось в литературе с попыткой дать подходящее объяснение. Фон Бецольд описал это явление как «spreading эффект», т. е. эффект распространения [79] и, очевидно, так его и понимал, хотя это и противоречит нашим теперешним убеждениям и большинству утверждений современных авторов, которые придерживаются иной точки зрения. Характер этого явления иллюстрируется вклейкой XI. Правый и средний участки узора во втором ряду сверху отличаются лишь тем, что между красным и синим на правом участке начерчены черные линии, которых нет на среднем. Во всем остальном оба участка идентичны и напечатаны одинаковыми красками (черное было напечатано с отдельного клише, на котором имелись только эти обводные линии). Легко заметить, что цвета участка с черными линиями темнее соответствующих цветов на среднем участке узора. Многим наблюдателям правый участок будет казаться более насыщенным, и на самом деле этот участок обладает более высоким контрастом. Очевидно, черное зрительно добавляется к цветам правого участка, и поэтому они кажутся темнее, в то же время кажется, что между цветами существует увеличенное различие. Эффект настолько явный, что большинство наблюдателей видит четкую вертикальную линию на рисунке там, где начинается черная обводная линия.

Такое же явление только с обратным знаком можно обнаружить на левом участке узора, где черные линии заменены белыми. В этом случае белое добавляется к цветам, вызывая увеличение яркости и

потерю насыщенности. Аналогичные явления легко заметить на других узорах вклейки.

Необходимо указать, что изменение по яркости прямо противоположно нашим привычным понятиям о контрасте [83]. Наличие черной окантовки в изображении должно было «просветлить» цвета аналогично тому, как белая окантовка должна была вызвать потемнение цветов.

Другое явление такого же порядка, на которое не обращали должного внимания, есть «эффект расстояния». Соотношения между двумя цветами или группой цветов с малыми окрашенными участками при малом расстоянии до глаз совсем иные, нежели при больших расстояниях. Группа малых цветных пятен может образовать гармоничное единство на расстоянии 35—50 *см* и покажется совершенно разобщенной на расстоянии 3 *м* и более; может быть также и наоборот. Художественная картина может показаться вблизи плоской и малонасыщенной, а при увеличении расстояния может приобрести хорошую контрастность с умеренно насыщенными цветами. Наоборот, незамысловатый цветной образец в руке может выглядеть значительно более насыщенным, чем при наблюдении через всю комнату даже при равной интенсивности освещения. Читатель, вероятно, понимает, что объяснить такое явление непросто. Утверждение, что краски, использованные в старинной миниатюрной живописи, должны были иметь и имели предельно достигаемую насыщенность, и утверждение, что эти же краски, использованные в больших полотнах, могли дисгармонировать и выглядеть безвкусными, следует считать признанием недостатка наших знаний. В современной практике цветной фотографии найдена параллель между этими явлениями. В этом случае можно считать установленным, что маленький отпечаток должен быть изготовлен с гораздо более высокой насыщенностью, нежели отпечаток средних размеров, в то же время фотографии большого размера могут быть темными, не производя неприятного впечатления.

Работа Джадда в области восприятия цветных поверхностей

Имеется всего лишь несколько работ, в которых пытаются найти количественные выражения для определения восприятия цвета. Пожалуй, наиболее существенной является работа Джадда [34], опубликованная в январе 1940 г., в которой он эмпирически вывел формулы, включающие все известные переменные, участвующие при восприятии цвета поверхностей в условиях однородного освещения. В экспериментальной части ему помогли параллельные исследования Хелсона, который впервые стал заниматься этой проблемой.

На белом и черном картоне с 80 и 10%-ным отражением были беспорядочно наклеены 15 кусочков цветной бумаги произвольной конфигурации. Размер образцов был примерно равным 6 $см^2$. От наблюдателя потребовали, чтобы он их рассортировал по степени яркости на более светлые и более темные. Затем он должен был по десятиступенной шкале определить светлоту образцов от черного до белого, а также степень насыщенности от серого до наиболее насыщенного цвета в группе. И наконец, он должен был назвать цветовой тон каждого образца по восьмиступенной шкале цветовых тонов. Во всех случаях ему была разрешена и промежуточная оценка. Все это было проделано для образцов на белом и затем на черном картоне при пяти различных типах освещения (источник дневного света и четыре цветных источника). Таким образом, можно было изучить 150 различных комбинаций из образцов, типов освещения и фона. Во всех экспериментах, за исключением определения светлоты, образцы располагались друг от друга на расстоянии 1,5 *см* и более и наблюдателю нужно было быстро переходить от одного образца к другому, для того чтобы можно было исключить, насколько это возможно, влияние каждого образца на оценку цвета других образцов.

Были получены эмпирические формулы, учитывающие следующие предположения:

1) допускалось, что равенство двух полей по цвету имеет место в том случае, если расчетные цветности и коэффициент отражения для данных условий наблюдения соответственно равны; это и есть основное предположение психофизики цвета;

2) возможно рассчитывать и цветовой тон, и насыщенность по психофизическим данным, которые были использованы при определении равенства или неравенства цветов, т. е. допускалось, что цветовой тон и насыщенность определяются физическими свойствами возбудителя;

3) светлота зависит от коэффициента отражения образца с учетом влияния коэффициента отражения поля в целом;

4) насыщенность и цветовой тон зависят от всех учтенных факторов и их нельзя рассматривать как независимые переменные;

5) постоянство цветовой адаптации наблюдателя в процессе опыта.

Для более подробного ознакомления с этой проблемой рекомендуем обратиться к статье Джадда [36], так как в ней имеются формулы, в которых использованы значения стандартной шкалы цветности. (Эта система кратко будет рассмотрена в гл. XIII.)

Результаты, полученные в этой работе, были обнадеживающими: с помощью формул удавалось с удовлетворительной точностью предопределить светлоту для 97% всех комбинаций, цветовой тон для 84% и насыщенность для 73%. Следует, однако, иметь в виду,

что ступени использованных 11- и 8-ступенных шкал слишком большие и что вариации в оценках наблюдателей были существенными. Тем не менее успех этих исследований показывает, что бóльшая часть основных переменных достаточно изучена, хотя бы для поверхностных цветов при цветном освещении, и что достаточно тщательное исследование по всем переменным даст возможность точно рассчитывать восприятие таких цветов, исходя из физических характеристик конкретных условий.

Конечно, не было сделано никаких попыток ввести в эти рассуждения какие-либо сугубо индивидуальные психологические вариации между наблюдателями, кроме статистического усреднения. Весьма сомнительно, можно ли осуществить такие расчеты для неограниченных условий, включая неповерхностные цвета, а также неоднородность освещения по освещенности и цветности.

В любом случае такие расчеты будут полезны, хотя бы для качественного определения тех ограничений, с которыми связано восприятие частного распределения энергии. Можно только желать, чтобы такие расчеты стали наконец возможными.

Эффект Хелсона — Джадда

В уравнении Джадда скрыто явление, которое в известной мере исследовал Хелсон. Если наблюдатель рассматривает объекты, освещенные интенсивно окрашенным светом, то его адаптация достигает крайнего предела и эффекты, которые были бы удивительны при более нормальных условиях адаптации, приобретают такой необычный характер, что в них трудно поверить. Если комната или какая-либо натура освещены, например, интенсивно красным светом, то чувствительность красного приемника и в известной мере синего существенно подавляется по сравнению с зеленым. Результатом будет такая высокая чувствительность зеленого приемника относительно двух других, какая никогда не встречается в обычных условиях. В этих условиях глаз как бы теряет всякую возможность видеть черное, все тени и все участки, которые в обычных условиях выглядели бы затененными, черными, становятся нейтральными или зелеными. На самом деле, чем глубже черное в обычных условиях, тем более насыщенно-зелеными воспринимаются эти участки. Этот эффект подобен эффекту, возникающему в телефонной сети. От каждого глаза отходят около 1 млн. нервных окончаний, которые затем собираются в кабель толщиной всего лишь в долю сантиметра. Невозможно предположить, что токи, идущие по этим нервам, не воздействуют на соседние каналы, через которые ток не течет. Если, как следует предполагать, красный, синий и зеленый нервные каналы разделены, то именно зеленые каналы больше всего будут «поражаться» этими «перекрестными разговорами». Уровень воз-

буждения, несомненно, будет низким по сравнению с внешним возбудителем, однако будут иметь место два явления: во-первых, такое возбуждение уменьшит насыщенность всех непосредственно возбужденных участков и, во-вторых, все участки, не подвергшиеся непосредственным возбуждениям, будут казаться зелеными. Оба эффекта можно экспериментально подтвердить, а также дать им объяснение с помощью нашей гипотезы. Но следует иметь в виду одно обстоятельство, которое будет критическим для нашего объяснения. Чтобы это явление имело место, как мы предполагали, снижение чувствительности должно произойти не в сетчатке, как считают большинство авторов, а в затылочных областях или в еще более высоких центрах коры головного мозга. Что такие и им подобные эффекты действительно имеют место именно в этих сферах, показывают работы Келера и других, а также часто упоминающийся факт, что при благоприятных обстоятельствах возникает бинокулярное явление цветового контраста.

В любом случае мы обязаны Хелсону и Джадду тем, что они обратили наше внимание на это важное явление, и, может быть, в противоположность мнению Гельмгольца мы имеем право называть это явление эффектом Хелсона — Джадда. Работа Хелсона недвусмысленно доказывает существование этого эффекта при уже явно ощутимых уровнях, а уравнение Джадда, можно считать, доказывает, что «перекрестный разговор» следует учитывать в расчетах при более или менее нормальных условиях наблюдения даже с первым приближением точности.

Внимание, целенаправленность и память в процессе цветового зрения

Вероятно, читатель уже убедился в том, что деление проблемы цвета на физический, психофизический и психологический аспекты не является только искусственным приемом, облегчающим автору составление книги. Излучение видимого цвета, оценка цвета стандартным наблюдателем в стандартных условиях и восприятие цвета, возникающее индивидуально и в реальных условиях, — суть три отчетливо разделяемых явления. Каждое подчиняется своим собственным законам и имеет свои специфичные отличия. Число возможных спектральных распределений энергии, очевидно, бесконечно. Психофизики выявили, что в результате таких распределений энергии возможно возникновение около 1 млн. различных цветов. Джадд рассчитал, что при достаточно больших вариациях условий наблюдения число различных цветов, которые могут быть восприняты, достигает 10 млн.

Но даже расчеты Джадда не исчерпывают вариаций, которые может создать жизнь. Выше мы отметили, что условия проявления

цвета дают повод для своеобразного вида восприятия, различного для каждых условий. Средний наблюдатель совершенно не способен сравнить какие-либо два цвета, заметно отличающихся по своим качествам. Мало кто, например, может сравнить цвет куска блестящего сатина и куска матовой хлопчатобумажной ткани и прийти к удовлетворительному выводу, если оба цвета близки. Но даже в случае, если прецизионные измерения установили психофизическое равенство двух цветов, то различие физических качеств является достаточным препятствием для признания их идентичности. Аналогичные препятствия имеют место в случае глазированного и матового фарфора, порошкового и прозрачного материала и во многих подобных случаях. Если принять во внимание подобные психологические осложнения при оценке числа воспринимаемых цветов, то это число будет настолько большим, что следует считать его бесконечным.

Этими заключительными соображениями мы не хотели создать впечатление, что цвет не может быть рассчитан или что проблема цвета безнадежно сложная. Мы искренне преследовали цель показать, что изучение цвета далеко не простая, а комплексная наука и что красота природы вызвана бесконечными вариациями цвета и формы, создаваемыми множеством типов и качеств.

Следует сделать одно упрощающее замечание по этому поводу. Обычный наблюдатель, не специалист по цвету, попытается узнать в первую очередь свойства объекта. Это замечание относится, хотя и в несколько другом смысле, к художникам и людям, которые так или иначе стараются «видеть» природу. Видеть цвет в частных условиях — в лучшем случае специфичный комплекс внимания, целенаправленности и памяти. То или другое выступает в зависимости от мотивов индивидуума в результатах, которые невозможно предопределить без учета индивидуальных особенностей. Обычный наблюдатель скажет, что лист зеленый, даже если свет, достигающий его глаз, синий, он этого даже не заметит. Художник, если он смотрит через зеленую листву, скажет, что вид вдаль розоватый: он смотрел на цвет, и его адаптация на листву вызвала розоватый цвет далекого тумана. Заинтересованный неспециалист скажет, что теневая сторона коробки такая же желтая, как и освещенная, потому что он смотрит на качество поверхности. Все по-своему правы и все имеют право на свое суждение. Цвет — это то, что вы видите, а не то, что вы могли бы видеть.

ГЛАВА XII

Измерение цвета

До сих пор физика, психофизика и психология цвета рассматривались нами в широком плане. Были сделаны попытки представить цвет как одно целое для выявления взаимосвязей между характеризующими его переменными. Теперь на основании вышеизложенного материала необходимо применить тот же подход к вопросу об измерении цвета. Затем следует рассмотреть методы спецификации цвета, базирующиеся на законах смешения цветов.

Тщательное изучение материала предыдущих глав показывает, что выражение «цвет объекта» довольно неопределенно. Существует очень мало объектов, цвет которых не меняется так или иначе с изменением направления наблюдения или источника освещения, и трудно создать такие условия наблюдения, в которых бы цвет воспринимался одинаково. Однако в большинстве случаев эти изменения цвета малы по сравнению с гаммой всех возможных цветов даже в случае, когда они весьма велики по сравнению с предельно воспринимаемыми различиями. При попытке определить цвет более точно необходимо ограничить условия наблюдения и освещения, чтобы исключить возможные изменения цвета. При прецизионных измерениях цвета необходимо точно указывать условия, при которых они производились. Однако этими условиями часто пренебрегают. Цвет, измеренный в одних условиях, может настолько измениться при изменении условий, что результаты измерений будут менее точны, чем при непосредственной визуальной оценке. В частности, например, спектральная кривая поверхности характеризует ее отражение лишь *в тех условиях*, для которых производились измерения. Это не описание поверхности, а лишь одна из ее характеристик. Если этот вопрос рассматривать иначе, то результаты могут быть весьма противоречивыми. В настоящей главе будут рассмотрены различные методы измерения цветовых характеристик. Две последующие главы посвящены вопросам правильного применения техники измерения.

Измерение отражения

По физическому определению, отраженный поверхностью свет есть часть падающего света, которая не поглощается и не пропускается самой поверхностью. Коэффициент отражения равен отно-

шению всей отраженной энергии к энергии падающего света или тому же отношению, но для какого-либо частного приемника.

В любом случае спектральные свойства падающего света и приемника, если он применяется, имеют такое же важное значение, как и свойства самой рассматриваемой поверхности. Это положение позволяет использовать многочисленные возможности измерения отражения. Так, например, нужно различать световой коэффициент отражения, когда глаз является приемником, абсолютный коэффициент отражения (в определенном участке спектра) или коэффициент фотоактиничного отражения, когда приемником является какой-либо фотографический материал, и т. д. В одних случаях наиболее удобными и точными являются измерения абсолютных значений коэффициентов отражения описанным выше методом, в других — лучше измерить отражение по отношению к некоторой стандартной поверхности. Обычно в качестве такой поверхности используют пластины со свежим покрытием окисью магния, обладающие высоким коэффициентом отражения по всему видимому спектру, мало зависящим от длины волны. Существуют два принципиально различных способа измерения отражения. Первый способ может быть назван интегральным, второй — спектральным. В первом случае весь отраженный свет воздействует на приемник и результат сравнивается с результатом, полученным тем же самым приемником при измерении отражения стандартной поверхности, например окиси магния. Результат выражается либо в виде отношения, либо в процентах. Второй случай относится к измерениям отражения для каждой длины волны и, как правило, не зависит от использованного приемника.

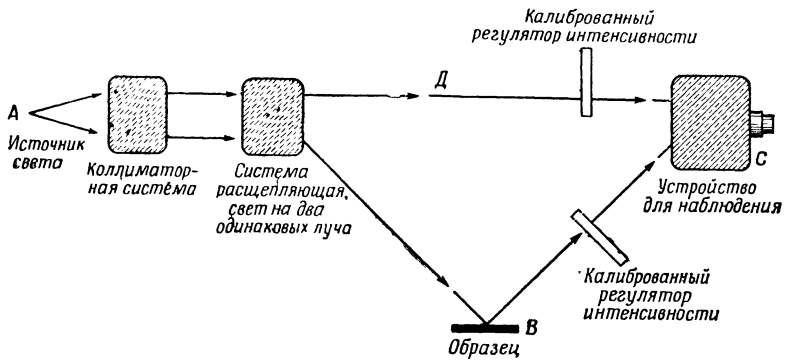
Обычно при определении интегрального отражения измерения производятся относительно глаза. В этих условиях определяется значение так называемого коэффициента яркости или коэффициента отражения [1]. Фактически эти измерения могут быть выполнены различными способами, но все они должны учитывать свойства глаза наблюдателя. Пожалуй, наиболее простым, но во многих отношениях наименее точным является способ сравнения искомой поверхности с набором эталонных поверхностей с известным отражением и определения места исследуемой поверхности в шкале. Этот метод дает удовлетворительные результататы в тех случаях, когда цветовой тон и насыщенность эталонов сравнения идентичны с образцами. Если цвет отличается по насыщенности и цветовому тону от эталона, то сравнение становится более сложным и значительно менее точным.

[1] Определение отражения путем сравнения яркости измеряемого образца с яркостью поверхности, покрытой окисью магния, дает величину коэффициента яркости. Значения коэффициентов отражения и яркости совпадают между собой лишь для идеально рассеивающей свет поверхности.— *Прим. ред.*

Для определения коэффициентов отражения с высокой точностью используются специальные приборы — фотометры и спектрофотометры.

Фотометры и спектрофотометры

Общий принцип построения таких приборов показан на фиг. 12.1. Луч света от источника A падает на образец B. Отраженный от образца свет попадает в устройство C, предназначенное для визуального наблюдения. Одновременно в то же устройство C попадает



Фиг. 12.1. Схема спектрофотометра.

свет от того же источника по второму каналу D. Это устройство сделано таким образом, чтобы свет двух каналов был бы виден на двух соприкасающихся участках поля зрения. Однако при этом должны быть приняты меры к тому, чтобы интенсивность света в каждом канале регулировалась со строго калиброванной степенью ослабления. Перед началом измерений необходимо установить эталон сравнения (обычно окись магния) и варьировать интенсивность до достижения полного равенства полей по яркости. Эта операция обеспечит установку измерительного устройства на 100. Затем эталон заменяют образцом и вновь достигают выравнивания по яркости. По известной величине ослабления луча в канале сравнения может быть рассчитан коэффициент отражения или яркость. В некоторых приборах отсчет производится непосредственно по отградуированной шкале.

Технические приемы для всевозможных методов измерения интегрального отражения приведены в литературе по фотометрии [13, 22, 43, 53, 66, 74, 75, 77, 80], и поэтому нет необходимости дополнительно разбирать их здесь. В этой связи следует подчерк-

нуть, что цифровой результат, полученный для данного образца, относится к конкретным условиям его освещения, к выбранному направлению измерения отраженного света и к глазу как приемнику.

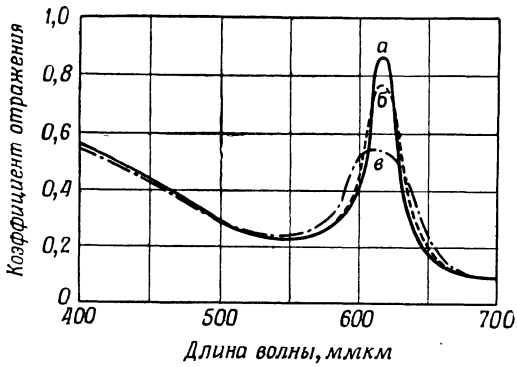
Второй вид измерения отражения — измерение спектрального отражения или, точнее, измерение отражения в узких участках спектра в том диапазоне длин волн, который требуется исследовать в данном случае. Практическое значение спектральных измерений при исследовании цвета значительно больше, чем интегральных, и поэтому они будут обсуждаться нами подробнее. Тем не менее читателю для более детального изучения сложной аппаратуры, используемой в этой области, следует обратиться к специальным изданиям.

Так называемые спектрофотометры работают по тому же принципу, что и рассмотренные выше интегральные фотометры. Свет, отраженный от образца, сравнивают со стандартным светом, который в свою очередь сравнивают с эталоном белого. Однако в этом случае сравнение производится для света, ограниченного узким диапазоном длин волн. Этот процесс повторяют в конечных промежутках по всему спектру и получают серию числовых значений, которые можно нанести на график, по оси абсцисс которого откладываются длины волн. По полученным точкам строят спектральную кривую отражения образца.

Тщательное исследование этого метода показывает, что такие измерения практически не зависят от спектральной чувствительности приемника, используемого в системе. Если выделяемый при измерениях интервал длин волн света достаточно мал и чувствительность приемника в этом интервале меняется мало, то непостоянство чувствительности приемника по длинам волн не может повлиять на полученные результаты. Необходимо лишь, чтобы чувствительность приемника при всех длинах волн была достаточной для получения точных данных. Независимость измеренных таким путем величин от спектральной чувствительности приемников обеспечивает существенные преимущества этого метода. Во-первых, исключаются вариации между различными наблюдателями, свойственные визуальным приборам, во-вторых, возможно использование физических методов измерения с применением фотоэлементов с произвольной чувствительностью и, в-третьих, отпадает необходимость в учете селективной чувствительности самой аппаратуры.

Широкое применение благодаря своим преимуществам получил фотоэлектрический метод измерения спектральных кривых отражения. Тот факт, что интегральное отражение легко подсчитать по спектральным кривым отражения для любого приемника с известным распределением спектральной чувствительности, заставляет принять спектральные кривые отражения в качестве основных характеристик образцов.

Спектрофотометрия стала большой и сложной областью техники, и сейчас существует множество различных типов приборов, с помощью которых могут быть получены спектральные кривые.



Фиг. 12.2. Расчетные кривые отражения образца.

а — для предельно узкой полосы пропускания спектрофотометра; *б* — для полосы пропускания 20 *ммкм*; *в* — для полосы пропускания 50 *ммкм*.

Различают две принципиально разные группы приборов. В первой группе приборов измерения осуществляются чисто монохроматическим светом, полученным при помощи механического диафрагмирования полного спектра до весьма узкого спектрального участка. Эта часть прибора называется монохроматором, а весь прибор, в котором использован монохроматор, можно назвать монохроматическим спектрофотометром. К другой группе относятся приборы, в которых измерения производятся светом со значительно более широким диапазоном длин волн. Такие более широкие полосы иногда получают с помощью светофильтров, иногда с помощью диафрагмирования спектра. В том и другом случаях полученные на таких приборах результаты для каждой точки относятся к довольно широкой полосе спектра. Этот метод можно назвать «упрощенной» спектрофотометрией.

Результаты, полученные на приборах этих двух групп, существенно различаются в одних случаях и очень хорошо совпадают в других. Ширина спектральной полосы, использованная при измерениях, определяет предельную крутизну спектральной кривой отражения, которая может быть воспроизведена данным прибором. Предположим, что образец имеет истинную спектральную кривую отражения, подобную показанной на фиг. 12.2 (кривая *а*). Если спектрофотометр выделяет полосу шириной 20 *ммкм*, мы получим кривую *б*, а при измерении с полосой 50 *ммкм* мы получим в лучшем случае кривую *в*. Поэтому для таких образцов необходимо использовать монохроматический спектрофотометр. Если же отражение плавно изменяется с длиной волны, то результаты, полученные на упрощенных приборах, могут быть вполне удовлетворительными. Широкое распространение таких приборов объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, для большинства красок поглощение

плавно меняется с изменением длины волны и, во-вторых, такие приборы относительно дешевы.

Другими конструктивными особенностями спектрофотометра, влияющими на результаты измерений, являются: 1) геометрические условия освещения измеряемой поверхности; 2) геометрические условия измерения отраженной части приемником; 3) распределение чувствительности приемника по спектру; 4) абсолютная чувствительность приемника.

В предыдущих главах неоднократно указывалось, что свет, отраженный от образца, может в значительной степени зависеть от того, *как* он падает на поверхность. Этот вопрос имеет весьма существенное значение для спектрофотометрии. Часто предполагают, что кривые, полученные при помощи спектрофотометра, должны быть одинаковы для любого вида освещения. Для некоторых образцов такое предположение приводит к большим ошибкам. Если в приборе образец освещается диффузным светом, то результат измерения будет согласован с визуальной оценкой образца только при условии, если он так же освещается диффузно. Аналогичное положение имеет место при направленном, а также при любом другом виде освещения.

Те же замечания справедливы и для условий приема отраженного света приемником. До тех пор пока оптическая система, использованная в приборе, не будет находиться в тех же условиях по отношению к образцу, что и глаз, результаты не будут соответствовать полученным глазом при непосредственном наблюдении. Однако это не значит, что спектрофотометр не является качественным прибором. Прогресс, достигнутый за последние 50 лет в области колориметрии, основан именно на применении этих средств. Практически изучать цвет без спектрофотометрии нельзя; если даже условия измерения существенно отличаются от условий наблюдения, результаты все-таки являются первым приближением к истине и потому очень ценны. При попытке определить с помощью спектрофотометра, совпадают ли два образца по цвету при их одновременном рассматривании, очень важно, чтобы и при наблюдении и при измерении получались одинаковые результаты. Вполне возможно, например, что два образца — глянцевый и матовый,— визуально имеющие одинаковый цвет, при измерении на каком-либо приборе дадут существенно отличающиеся результаты. Возможен обратный случай: два образца с глянцевой и матовой поверхностями могут восприниматься глазом как имеющие разный цвет, а результаты измерения на приборе указывают на их равенство по цвету.

Чувствительность приемника

В монохроматической спектрофотометрии спектральная чувствительность приемника, будь то глаз, фотоэлемент, болометр или любое другое светочувствительное устройство, не влияет на конечный результат. Так как используемый свет ограничен очень узкой областью длин волн, то при каждом измерении используется чувствительность приемника, присущая только этой области. Если область очень узкая, можно считать, что чувствительность внутри каждого диапазона достаточно постоянна, и результаты не будут зависеть от приемника. При более широкой области, применяемой в упрощенных спектрофотометрах, изменение чувствительности приемника с длиной волны вызовет различие в отсчетах для разных приемников, т. е. результаты будут зависеть от приемника. Очевидно, решающим фактором является плавность кривой спектральной чувствительности приемника и кривых отражения.

Если внутри каждого участка спектра, в котором производятся измерения, обе эти зависимости достаточно плавные, то их непостоянство мало влияет на результаты. В обратном случае результаты могут быть весьма неточными и могут ввести в заблуждение. Очевидно, для всех спектрофотометров можно принять следующее условие: наибольшим диапазоном длин волн, обеспечивающим высокую точность результатов, является тот, внутри которого ни приемник, ни образец не имеют заметных вариаций для любого участка спектра. Если свойства образца совсем неизвестны, то для его измерения должен быть использован только прибор с минимальной шириной полосы. В случаях, когда необходимо измерить однотипные образцы, можно использовать упрощенный прибор. Во многих случаях эти ограничения несущественны и упрощенные приборы находят широкое применение, так как они дешевы и работают с повышенной скоростью. Однако во избежание серьезных ошибок точность их работы следует контролировать по монохроматическим приборам.

Другим важным параметром, влияющим на результаты измерения, является абсолютная чувствительность приемника. Чем ниже предельная интенсивность света, которая может быть измерена данным приемником, тем ниже минимальный коэффициент отражения, измеряемый прибором, хотя этот предел зависит также от интенсивности падающего на образец света и от условий, в которых отраженный свет воспринимается приемником. Каковы бы ни были причины ограничения, всегда минимальное отражение, которое показывает прибор, определяет степень его точности [1].

[1] Минимальное значение коэффициента спектрального отражения, которое может быть отсчитано по прибору, не определяет его точность. Точность работы спектрофотометра зависит от линейности его шкалы, наличия рассеянного света и пр. — *Прим. ред.*

Обычно спектрофотометр не позволяет отсчитывать меньше 1% отражения в любом участке спектра. Хотя такая точность приемлема для большинства образцов, однако существуют случаи, когда она недостаточна. Например, в синем участке спектра часто бывает необходимо произвести измерения коэффициентов отражения, меньших 0,1%, чтобы расчеты, произведенные на основании кривых, имели бы удовлетворительную точность. Однако в связи с тем, что разработка и изготовление таких приборов довольно сложны, они очень дороги и поэтому для большинства практических целей не применяются. Доступные приборы для выполнения подобных измерений с каким-либо приемником, кроме глаза, еще не разработаны.

Для отражающей поверхности нижний предел измерения менее важен, чем для прозрачного образца. Интегральное отражение большинства отражающих поверхностей не слишком мало, и во всех случаях такие образцы рассматриваются при адаптации глаза к высоким уровням освещенности. Для прозрачных образцов требования могут значительно отличаться и пропускание порядка 0,001% часто имеет существенное значение.

Уже подчеркивалось, что условия освещения и наблюдения для спектрофотометрической аппаратуры должны быть стандартизированы, чтобы было возможно сравнивать результаты измерений. Хотя это требование вполне справедливо для образцов любого типа, однако оно для разных образцов различно. Для некоторых видов измерений стандартность условий освещения и наблюдения настолько важна, что может потребоваться разработка специального прибора, особенно если необходимо произвести измерения отражения металлической поверхности или образцов, которым присуще явление люминесценции при обычном освещении.

Металлические и люминесцирующие образцы

Во всех случаях, когда обычные глянцевые поверхности, например лакированное дерево или подобная ему поверхность, освещаются солнечным светом, существенная часть падающего света зеркально отражается без селективного поглощения. Если такой образец оценивается наблюдателем, который желает рассмотреть само дерево, он смотрит на него под таким углом, чтобы не видеть зеркального луча. В этих условиях он видит дерево только благодаря свету, отраженному незеркально. Но если такой образец освещается рассеянным светом, идущим, например, от освещенной полусферы, то не существует положения, при котором отражение от этой полусферы могло бы быть исключено, поэтому яркость воспринимается как сумма зеркального и незеркального отражений. Так как условия наблюдения в первом случае более распростра-

нены, чем во втором, то большинство (но не все) спектрофотометров рассчитано для имитации первых условий. Обычно при разработке спектрофотометров принимается система, в которой зеркально отраженный луч выводится из поля зрения и в измерении участвует лишь свет, отраженный диффузно. Такая система удовлетворительна для образцов с преимущественно диффузным отражением. Особое значение имеет металлическая поверхность. Как уже говорилось, зеркальный луч для металлов отражается селективно, и распределение энергии зеркального отражения характеризует его визуальный эффект. Если производить измерение отражения полированных образцов меди или латуни прибором, в котором зеркальное отражение исключено, то он либо не даст никаких, либо даст незначительные показания, хотя правильно измеренное отражение может составлять 60—100%. Очевидно, в этом случае должна быть измерена именно *зеркальная* составляющая отражения.

То, о чем здесь говорилось, можно применить и к другим типам образцов. Часто цвет опалов или крылышек бабочек виден только при рассмотрении образцов в определенном *направлении*. Если измерение производить не в этом направлении, то результаты могут отличаться от визуальных наблюдений. Поэтому, чтобы имело место согласование между измеренным распределением энергии и визуальным эффектом, условия освещения и приема при исследовании образцов должны быть идентичны условиям, при которых образец рассматривается наблюдателем.

Подобное положение, вызванное, однако, в большей степени характером освещения, чем способом приема отраженного света, возникает и в случае измерения люминесцирующих образцов. Многим красителям, особенно тем, которые используются для окраски одежды и т. п., присуще явление люминесценции при освещении обычным дневным или даже искусственным светом. Цвет таких изделий получается в результате аддитивного смешения спектрального отражения изделия и света, полученного от люминесценции. Поэтому кривая распределения энергии в спектре отраженного света при заданном освещении *включает в себя* и люминесценцию. С другой стороны, в физическое определение понятия отражения не входит свет, излучаемый поверхностью. Излучение, вызванное люминесценцией, имеет то общее свойство, что длина волны этого излучения больше длины волны возбуждающего излучения. Это обобщение известно как закон Стокса. Существуют два различных метода измерений, учитывающих люминесценцию. К сожалению, обычные спектрофотометры не только не измеряют цвет люминесцирующих образцов таким, как мы его видим, но дают неправильные измерения самого отражения в связи с тем, что в большинстве спектрофотометров образцы освещаются светом с очень узким диапазоном длин волн, а приемник воспринимает весь

свет, идущий от поверхности. Предположим, в частности, что краска люминесцирует под воздействием синего света с длиной волны 410 *ммкм* и дает зеленое излучение. Наш прибор будет принимать и записывать зеленое излучение, и, следовательно, прибор покажет высокое отражение в синем, хотя, может быть, в этой области образец очень слабо отражает. С другой стороны, какой-либо прибор, освещающий образец белым светом и измеряющий затем составляющую света с длиной волны 410 *ммкм*, *дает* правильные показания в синей зоне, конечно, в предположении, что в этой области вторичные излучения отсутствуют. Поэтому прибор, освещающий образец монохроматическим светом и измеряющий интегральное отражение, дает неправильные кривые для всех люминесцирующих образцов. Приборы же, в которых образец освещается белым светом [1], а измерение спектрального распределения осуществляется в отраженном пучке, дают результаты, соответствующие визуальному восприятию образца при тех же условиях освещения. Для измерения чистых кривых отражения независимо от люминесценции необходимо освещать образец монохроматическим светом и производить измерение в узком участке спектра таким образом, чтобы задерживались все длины волн отраженного света, кроме длины волны падающего света. При таком методе измерения люминесценция не будет влиять на результаты.

Таким образом, полная характеристика люминесцирующих красок или изделий, окрашенных такой краской, может быть представлена парой или семейством кривых, первая из которых должна охарактеризовать лишь истинное отражение от образца по длинам волн, а вторая — *излучение* люминесценции в зависимости от длины волны света, вызывающего ее. Такие кривые позволяют полностью характеризовать свойства люминесцирующей поверхности.

Селективное рассеяние

Об измерении спектральных кривых пропускания уже говорилось выше в связи с необходимостью использования в этих случаях приборов высокой чувствительности. Во многих других отношениях измерение кривых пропускания отличается от измерения кривых отражения. Рассмотрим случай, когда образец обладает существенным селективным рассеянием; это значит, что, помимо света, прямолинейно проходящего через образец, значительная часть его рассеивается или отражается не в направлении главного луча, причем количество рассеянного или отраженного света зависит от длины

[1] В этом случае излучение источника света должно быть нормировано как в видимой, так и в ультрафиолетовой областях спектра.— *Прим. ред.*

волны. Очевидно, возможны три вида измерений, которые могут быть выполнены на таких образцах: либо можно измерить весь проходящий свет, либо только рассеянный, либо только прямолинейно проходящий. Очевидно, что визуальный эффект при наблюдении образца определяется условиями его рассматривания. Предположим, что в качестве образца используется специально изготовленный кусок рассеивающего белого стекла и что это стекло установлено между наблюдателем и солнцем. Во многих случаях луч, проходящий без рассеяния, имеет темно-красный цвет. Вокруг этого непосредственно воспринимаемого луча имеется ряд областей в нарастающих углах от главного луча, в которых красное наблюдается меньше и меньше и наконец достигается предел, дальше которого виден лишь белый и голубовато-белый. Измерение прямого луча дало бы нам *красную* точку, которую мы и видим. При учете полного пропускания получается результат, соответствующий некоторой промежуточной области вокруг точки. Если же измеряется только рассеянный свет, то получают белый цвет стекла. Вероятно, другие примеры аналогичных явлений знакомы читателю.

Этого примера достаточно для подтверждения положения о том, что при всех спектрофотометрических измерениях необходимо учитывать характер освещения и способ наблюдения, так как оба эти фактора оказывают значительное влияние на специфику селективных свойств измеряемого образца. Результаты, полученные не в тех условиях, которые нас интересуют, не имеют смысла независимо от их точности.

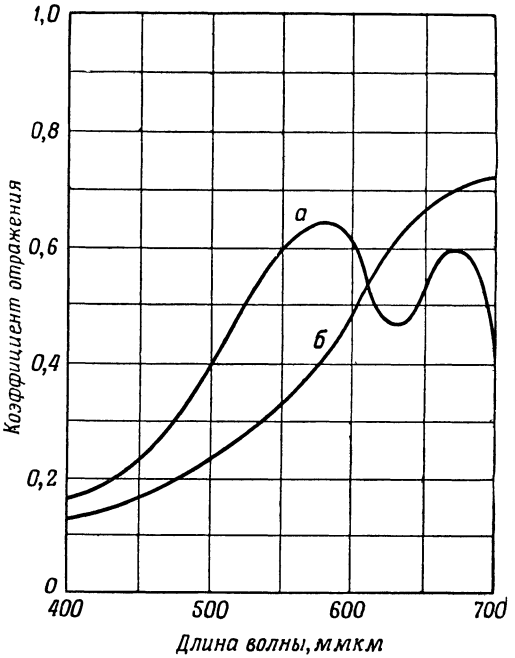
Оценка результатов

Рассмотрим теперь, какую практическую пользу можно извлечь из данных, полученных при измерениях. По спектрофотометрическим данным можно рассчитать интегральное действие на различные приемники, например глаз, фотоэлемент или термоэлемент; можно рассчитать интегральные коэффициенты отражения или пропускания для материалов с селективными характеристиками и при любой длине волны. Расчеты по спектрофотометрическим данным обычно требуют перемножения ординат спектральных кривых, взятых через определенный интервал длин волн, и последующего суммирования этих произведений.

Наиболее важным из этих расчетов является определение яркости и цвета излучения, воспринимаемого глазом. Как было указано выше, цвет излучения может быть однозначно определен путем указания количеств трех определенно выбранных первичных цветов, которые требуются для воспроизведения данного цвета. Для расчета цвета надо знать количества трех первичных цветов, необ-

ходимые для воспроизведения излучения каждой длины волны спектра единичной мощности.

Рассмотрим, как выполняются расчеты цвета на примере двух образцов, спектрофотометрические кривые (*а* и *б*) которых приведены на фиг. 12.3. Три кривые смешения первичных цветов для глаза стандартного наблюдателя приведены на фиг. 12.4. (В исследовании принимали участие многочисленные наблюдатели, поэтому результаты исследования усреднены.) Каждая кривая дает относительные количества первичных цветов, необходимые для воспроизведения монохроматического света любой длины волны с единичной энергией. Рассчитаем для каждой длины волны (или диапазона длин волн, внутри которого спектральные кривые изменяются мало) количества трех первичных цветов, необходимые для их воспроизведения. Для этого необходимо умножить значения интенсивности излучения для данной длины волны на соответствующие значения ординат кривых смешения $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$[1]).

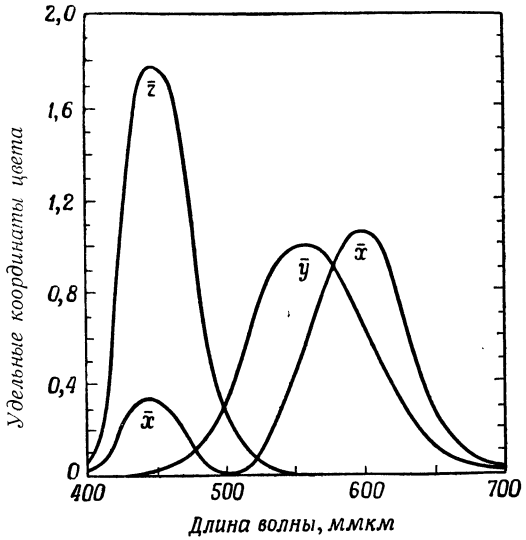


Ф и г. 12.3. Спектральные кривые отражения двух образцов.

Для определения координат цвета излучения, т. е. количеств основных цветов, необходимых для его воспроизведения, нужно рассчитать суммы указанных выше произведений, взятых через определенные интервалы длин волн. Если результаты, полученные таким путем для двух спектральных кривых (*а* и *б*), идентичны, то эти два цвета воспринимаются наблюдателем как одинаковые. Если

[1]) Для получения значений спектральных интенсивностей излучения необходимо умножить значения спектральных коэффициентов отражения (кривые *а*, *б*, фиг. 12. 3) на соответствующие значения спектральной интенсивности используемого источника света.— *Прим. ред.*

в результатах расчета для двух образцов обнаруживается какая-либо разница, то оценку этих результатов можно произвести лишь с учетом ряда факторов, о которых здесь еще не упоминалось. Эти



Ф и г. 12.4. Удельные компоненты в системе МКО.

факторы мы обсудим в следующей главе при рассмотрении вопроса о спецификации цвета. В ней будет показано, что такой способ сравнения позволил создать систему спецификации цвета, которая приобрела важное значение для всех исследований в этой области.

Колориметрия

Для колориметрических измерений обычно используют специальные приборы, которые устроены так, что цвет образца виден на одной половине поля, рассматриваемого в окуляр. Это поле обычно простой геометрической формы (круг или квадрат) разделенное вертикальной линией на две половины. В некоторых приборах одна часть поля полностью окружает вторую; бывают случаи, когда поле разделено на три или более частей. Конфигурация поля выбирается так, чтобы облегчить цветовое различение между частями поля, хотя подчас ее выбор определяется конструктивными соображениями. В хороших колориметрах линия раздела полностью исчезает при достижении цветового равенства. В этом случае чувствительность прибора возрастает во много раз по сравнению с приборами, в которых линия раздела не исчезает полностью.

Вторая половина поля освещается светом с помощью особой оптической системы, в которой смешиваются три основных цвета; интенсивности этих цветов могут регулироваться до получения равенства цвета обеих частей поля. Имеется много возможных систем визуальных колориметров, каждая из которых наиболее удобна для проведения определенных измерений. Но в любой из этих систем глазу наблюдателя отведена одна и та же роль — он должен зафиксировать момент равенства цвета обеих половин поля колориметра. Количества основных цветов, которые необходимы для воспроизведения искомого цвета, могут быть использованы для характеристики этого цвета. Эти характеристики имеют ограниченную точность. Во-первых, полученные результаты справедливы только для одного частного наблюдателя, потому что наблюдатели могут сильно отличаться друг от друга. Во-вторых, сравнение справедливо только для условий освещения и наблюдения, принятых в данном приборе.

Если зрение наблюдателя случайно совпадает со зрением стандартного наблюдателя (чего практически не бывает), то полученные результаты будут идентичны рассчитанным. Чем больше различие между обычным и средним наблюдателями, тем больше вероятность того, что произведенная оценка будет неудовлетворительной для другого наблюдателя. Насколько велики вариации наблюдателей в этом отношении, точно неизвестно. Однако можно считать, что при тщательной оценке цвета наблюдателем, у которого зрение весьма близко к усредненному, полученные результаты будут неудовлетворительны приблизительно для 90% всех наблюдателей, потому что различия между наблюдателями значительно бо́льшие, чем наименьшая разница в цвете, которую они могут различить.

Весьма трудно описать весь диапазон встречаемых в обычных условиях вариаций зрения, начиная от полной слепоты, отсутствия цветового зрения, частичной слепоты к цвету самых различных видов, различных аномалий цветного зрения, до нормального зрения. Более того, наблюдатели отличаются не только по качеству цветового зрения, но и по чувствительности к энергии различных длин волн. Эти вопросы крайне сложны, и, пожалуй, еще недостаточно фактического материала для обобщений. Для более детального ознакомления читателю следует обратиться к приведенной в конце книги литературе. Однако отметим здесь следующие хорошо изученные факты.

Примерно 8% мужского населения белых рас и 0,5% женского обладают цветовым зрением, явно отличным от нормального. Около $^3/_4$ из них можно рассматривать как аномальные варианты нормального зрения, а $^1/_4$ имеет неполноценное цветовое зрение. Для оценки цвета стандартным наблюдателем требуются три переменные и цвет варьируется по трем качествам; поэтому мы говорим, что

стандартный наблюдатель обладает трехцветным зрением. Для него любой цвет может быть воспроизведен тремя произвольно выбранными цветными источниками. Количественные соотношения этих источников для каждого данного цвета несколько колеблются в зависимости от наблюдателя, однако эти отклонения находятся в определенных границах. Для воспроизведения аномальных случаев требуются тоже три источника, однако численное значение одного из источников находится за пределами нормальных границ, поэтому эти наблюдатели называются аномальными трихроматами. Упомянутая $^1/_4$ наблюдателей не отличает красного цвета от зеленого. Для этого типа наблюдателей (и некоторых других более редких типов) требуются только два соответствующим образом выбранных источника для воспроизведения всех цветов. Их называют дихроматами. Редко встречается полная слепота к цвету, при которой вообще отсутствует различие цветов. Эта группа монохроматов реагирует лишь на яркостные различия.

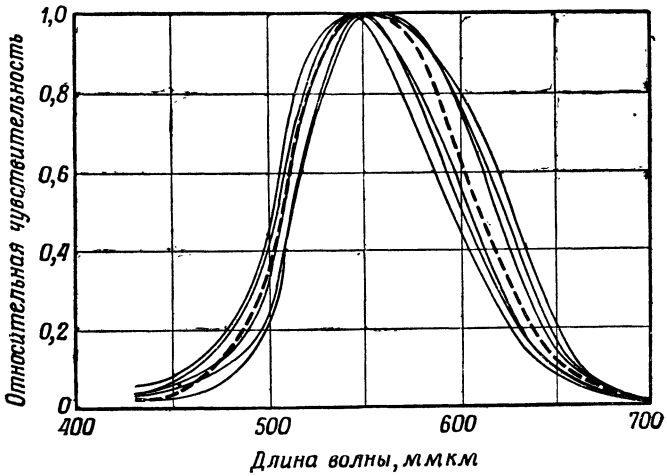
С точки зрения нормального наблюдателя весьма странным кажется следующий факт. Сравнение цвета двух образцов с различным распределением энергии в спектре по цветовому тону и насыщенности, произведенное нормальным наблюдателем, обычно бывает вполне приемлемым для дихроматов и, вероятно, также для монохроматов. Однако почти для всех аномальных наблюдателей эта оценка будет неудовлетворительной. С другой стороны, во многих случаях дихромат будет удовлетворен оценкой, которая неприемлема для нормального наблюдателя; но ни один наблюдатель не будет удовлетворен оценкой, произведенной аномальным трихроматом, если их аномалии различны. Таким образом, около 5—6% населения видят цвет отлично от остальных, в то время как около 2% видят меньше цветов или совсем их не видят.

Аналогичное положение существует при различении яркости между цветами, хотя в процентном отношении имеется отличие от аномалий, рассмотренных выше. Примерно $^3/_4$ людей с неправильным цветовым зрением — дихроматы или аномальные трихроматы — обладают нормальной чувствительностью по отношению к длинам волн. Это значит, что они произвели бы интегральное сравнение по яркости между двумя цветами так же, как и нормальный наблюдатель. А $^1/_4$ людей обладает существенно меньшей чувствительностью в длинноволновой части спектра, поэтому им для достижения равенства по яркости с другим цветом требуется значительно бо́льшая энергия в красной части спектра.

Таким образом, около 92% мужчин и 99,5% женщин обладают нормальным цветовым зрением. Приведенные данные не претендуют на точность, так как граница между нормальным и аномальным цветовым зрением слишком расплывчата и точное определение нормальности зрения в отношении спектральной чувствительности

по яркости затруднительно. Диапазон нормального зрения следует брать достаточно широким, приняв во внимание, что разница между отдельными людьми может быть довольно значительной.

Кривые видности для 6 из 52 наблюдателей, которые были изучены в 1922 г. Гибсоном и Тиндалем [22] (Национальное бюро стандартов), приведены на фиг. 12.5; различия между этими кривыми можно считать характерными для большинства людей.



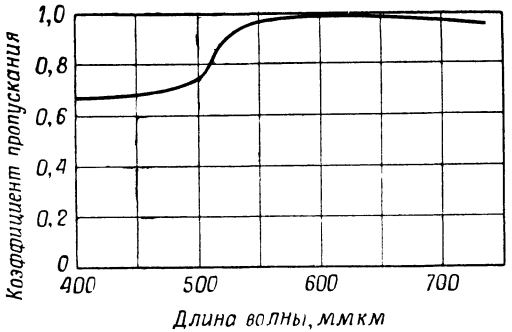
Ф и г. 12.5. Кривые видности для шести наблюдателей по сравнению со стандартной кривой МКО.

Эти кривые показывают существенное несоответствие данных разных наблюдателей [22].

Данных о вариациях кривых смешения для нормальных наблюдателей гораздо меньше, чем о вариациях кривой видности, и интерпретации их гораздо сложнее. Вероятно, основная разница между наблюдателями объясняется изменением количества желтого пигмента в центральной области сетчатки.

Необходимо тщательно рассмотреть, какое влияние на цветовое зрение может оказать такая разница. В центральной ямке сетчатки и вокруг нее имеется желтый пигмент, через который должен проходить весь свет, видимый этой частью глаза. Его кривая пропускания, по данным Троланда [77, стр. 109], для типичного среднего наблюдателя приведена на фиг. 12.6. Снижение пропускания в длинноволновой части происходит вследствие поглощения стекловидным телом, а в коротковолновой — желтым пигментом. Эта кривая характеризует умеренно интенсивный желтый цвет. При

длине волны около 440 *ммкм* пропускание составляет 67%. Если предположить, что это вещество подчиняется закону Бэра, то пропускание будет падать до 45% для людей, у которых пигмент имеется в двойном количестве по сравнению с нормальным, и будет расти



Ф и г. 12.6. Кривая пропускания желтого пятна глаза.

до 80%, если пигмента в 2 раза меньше. Учитывая существенную разницу в пигментации кожи, радужной оболочки глаз и волос для различных людей, такой диапазон изменения пигмента может казаться вполне вероятным. Цвет кожи меняется от альбиносов до негров, цвет волос — от блондинов до брюнетов, а цвет радужной оболочки — от чисто синего до очень темно-коричневого; поглощение в желтом пятне также вызвано пигментами. Наряду с этими рассуждениями некоторые факты также подтверждают, что такие вариации имеют место. Предположим, что свойства глаза и мозга двух крайне различных в этом отношении наблюдателей в остальном вполне идентичны и что их попросили произвести оценки цвета, используя в качестве основных цветов монохроматический свет с длинами волн 450 и 540 *ммкм*, причем цвета, подлежащие оценке, лежат где-то между ними. Очевидно, для наблюдателей с двойным количеством пигмента отношение энергии источников с длиной волны 450 и 540 *ммкм* будет больше, нежели для второго наблюдателя. Тот же эффект будет иметь место при определении этими наблюдателями энергии двух источников с дополнительными длинами волн, совместно дающими белый цвет. Один потребует большего соотношения, чем другой, если один из источников находится в коротковолновой области. То же повторится при определении этими наблюдателями кривой видности глаза, т. е. при определении энергии монохроматических источников всех длин волн, вызывающих ощущение постоянной яркости.

Если эти измерения будут выполняться многими наблюдателями, то можно обнаружить все три упомянутых отклонения. Поэтому у многих исследователей, работающих в этой области, укрепляется

мнение, что вариации внутри группы так называемых нормальных наблюдателей вызваны главным образом непостоянством количества желтого пигмента и что если было бы возможным произвести соответствующую коррекцию, то эта группа была бы значительно более однородна и более явно отделена от аномальных трихроматов и дихроматов. Эта точка зрения подкрепляется теми исследованиями Троланда, которые показали, что при корректировании кривой видности стандартного наблюдателя с помощью кривой фиг. 12.6 она принимает вид симметричной вероятностной функции. В настоящее время нет оснований опровергать это мнение, поскольку совокупность наблюдаемых фактов подтверждает их закономерность.

Отсюда можно сделать вывод, что как любой наблюдатель, пользующийся прибором, так и фиктивный стандартный наблюдатель, существующий лишь как математическая абстракция, не дадут результатов, приемлемых для третьего наблюдателя, который смотрит на образцы своими глазами. Более того, многие достаточно внимательные наблюдатели получат различные результаты для каждого глаза. Тем не менее это ни в какой мере не снижает значения спектрофотометрии и колориметрии. Вариации зрения от одного наблюдателя к другому являются частью проблемы цвета, и то, что мы знаем об их существовании, должно сделать нас более снисходительными к чужой оценке. Данные стандартного наблюдателя, стандартизованные МКО, являются наиболее вероятной базой для проведения расчета цвета.

Несколько раз в наших рассуждениях упоминалась гетерохромная оценка. Этот термин относится к уравниванию двух цветов по яркости, которые по одному или по всем другим качествам воспринимаются по-разному. С гетерохромными равенствами мы сталкиваемся во многих важных измерениях, имеющих теоретическое значение. Они необходимы, например, для определения кривой видности. В этих измерениях интенсивность монохроматических излучений регулируется таким образом, чтобы они воспринимались равными по яркости. Как было указано выше, такие измерения весьма сложны в том случае, когда применяется метод непосредственного сравнения. Однако их можно выполнить весьма точно, применяя метод мигающей фотометрии, которая базируется на следующем экспериментально проверенном факте: два луча различной интенсивности при сравнительно высокой частоте колебаний (примерно 40 *гц*) будут давать мигания, пока их яркость различна; если мигание, вообще-то говоря, сильно зависящее от условий наблюдения, полностью исчезает, то результат не зависит от различий в цветовом тоне и насыщенности, которые могут иметь место. Условия, при которых находят критическую частоту, и факторы, влияющие на эту частоту, обсуждаются во многих книгах

по фотометрии. Метод сам по себе испытан многократно и, как установлено, пригоден для всех случаев. Процесс сравнения двух монохроматических излучений по методу миганий заключается в том, что устанавливают критическую частоту двух монохроматических излучений, поочередно появляющихся в поле зрения фотометра, и регулируют отношение интенсивностей излучений по минимуму мигания. При этих условиях можно считать, что оба луча имеют равную яркость.

Таким образом, мы ознакомились с двумя основными методами цветовых измерений и специфическим методом мигающей фотометрии, предназначенным только для измерения яркости. В случае применения косвенного метода колориметрии результат рассчитывается по физическим характеристикам спектрального распределения энергии и известным свойствам глаза. При прямом визуальном методе колориметрии глаз используется лишь как нулевой индикатор в процессе регулирования физических переменных. В обоих методах цвет определяется путем нахождения его места в более или менее произвольной стандартной системе сравнения. Этот процесс, называемый спецификацией цвета, будет более подробно разобран в следующей главе. Прежде чем приступать к детальному рассмотрению этого вопроса, желательно несколько глубже проанализировать вопрос о ценности цветовых измерений, произведенных описанными выше методами. В частности, эти методы необходимо сравнить со значительно более простым методом определения цвета путем сравнения цвета исследуемого образца с коллекцией стандартных образцов известного цвета и установления, какой из стандартных образцов по цвету наиболее близок к измеряемому. Явное преимущество этого простого метода заключается в том, что и измерение, и спецификация образца объединены в одной прямой операции. Пока не выявлены ограничения этого метода, не видно преимуществ более длительных и кропотливых методов измерений. На самом деле, этот непосредственный метод применяется и дает хорошие результаты при решении определенных задач. Причины, почему в большинстве случаев колориметрия предпочтительнее, будут рассмотрены ниже.

Системы стандартных эталонов цвета

В гл. XI отмечалось, что цветовой тон, насыщенность и светлота, являясь наиболее важными психологическими характеристиками цвета, далеко не полностью описывают цвет. В частности, если речь идет о цвете поверхности, она может быть глянцевой или матовой, на ней могут быть блестки, фактура или она может обладать другими свойствами в добавление к цветовому тону, насыщенности и светлоте. Как отмечалось, эти дополнительные качества

могут оказывать существенное влияние на восприятие и в некоторых случаях даже изменять видимую насыщенность или цветовой тон независимо от распределения энергии в спектре источника света. К сожалению, не имеется достаточного количества систематических работ в этой области, которые позволили бы рассмотреть более строго вопрос о значении этих качеств при использовании системы материальных эталонов цвета. Коротко следует отметить, что если требуется сравнить цвет окрашенного образца с серией поверхностей известного цвета для выбора наиболее близкого по цвету, то при различных качествах образца и эталонов появятся значительные затруднения, вызывающие существенные расхождения между отдельными наблюдателями. Иными словами, если серия эталонов обладает матовой поверхностью без фактуры, а искомый образец высокоглянцевый с заметной фактурой, мало кто из наблюдателей будет в состоянии произвести удовлетворительную оценку. С другой стороны, общее согласование будет найдено без труда, если образец тоже матовый и без фактуры. Причины этого явления не вполне выяснены. Но можно предположить, что различные люди по-разному улавливают взаимосвязь между типом поверхности и цветом, причем это происходит автоматически, так сказать, подсознательно. Наличие фактуры, неизбежно приводящей к изменению яркости, дополнительно осложняет вопрос. Очень трудно сравнить однородные участки с неоднородными и установить их равенство по яркости. Так как такое сравнение может быть осуществлено лишь с невысокой точностью, то наблюдатель часто будет не уверен в своих результатах. Во всех случаях, когда образец и эталон существенно отличаются по качеству, сравнение становится сложным и часто неудовлетворительным. Несмотря на то что свет, прошедший через слой чистой воды и затем попавший в глаз, может быть таким же, как свет, отраженный от белой поверхности; они проявляются по-разному, и цвет, видимый наблюдателем, нельзя описать в одних и тех же выражениях: воду можно назвать чистой и бесцветной, а отражающую поверхность — белой. Темно-красная жидкость может пропустить такой же по качеству свет, что и свет, отраженный от темно-коричневой бумаги, но мало кто из наблюдателей, не имеющих специальных знаний и навыков, сможет установить это равенство.

Без дополнительных примеров, которые читатель может взять непосредственно из материалов, изложенных в последних трех главах, очевидно, что система эталонов, используемая для спецификации цвета методом визуального сравнения, имеет практически ограниченное применение. Чтобы такая система была вполне удовлетворительной, эталоны цвета должны обладать теми же качествами, что и образец. Отсюда вытекает наиболее общее положение, что набор эталонов должен быть изготовлен из того же мате-

риала, что и образцы. В действительности требования не так строги, так как многие качества можно учесть путем соответствующего выбора метода сравнения. Лучшей системой в каждом случае будет такая, в которой материал эталонов близок к материалу образцов. Текстиль легче сравнивать с текстилем, эмалированную поверхность с эмалевыми эталонами, блеклые поверхности с блеклой бумагой, жидкости с жидкостью и т. п. В связи с этим на практике используется много различных систем эталонов цвета.

Создать единую систему цветных эталонов, с помощью которой можно было бы непосредственно определять цвет любого образца, невозможно. Истинное определение цвета включает в себя более чем три параметра, и требуется множество трехмерных систем такого типа для удовлетворения всех нужд. Такие различные системы можно сравнивать между собой только колориметрическим методом, анализируя свет, отраженный от каждого образца. Сама по себе колориметрия определяет только три параметра цвета и поэтому может соответствовать лишь одной системе эталонов. В отличие от других систем колориметрия позволяет оценивать цвет любых образцов в единой системе. Однако в конечном итоге только система эталонов в состоянии дать полное описание образца и только в том случае, когда эта система обладает теми же качествами и имеет тот же внешний вид, что и образец.

К вопросам визуальной колориметрии можно подходить таким же образом. Если колориметр разработан так, что любой образец оценивается с исключением всех качеств, кроме цветового тона, насыщенности и светлоты, то, очевидно, получаемые результаты будут эквивалентны восприятиям только света без образца. В каналы сравнения прибора вводится только свет, так что в сущности для определения цвета свет сравнивается со светом. Таким образом, колориметрия становится как бы материальной системой, в которой свет заменяет материальный эталон. Она описывает явления адекватно для любого образца лишь в том случае, если от образца виден только свет. Отсюда очевидна ценность колориметрических данных, рассчитанных по спектрофотометрическим измерениям. При этом исключаются индивидуальные факторы, учитывается только свет без объекта и вариации между наблюдателями исчезают. Однако не следует забывать, что любой наблюдатель немедленно сталкивается с этими факторами, как только он *посмотрит* на образец.

При сравнении колориметрического метода оценки (непосредственно или расчетного) с методом оценки с помощью эталонов с точки зрения точности возникают иные соображения. Вероятно, желание достичь высокой точности, с одной стороны, и четкости описания цвета — с другой, являются основными причинами, которые так глубоко разделяют сторонников обоих этих методов

Точность, с которой может быть произведено сравнение двух лучей света с помощью соответствующего колориметра или сравнение двух полей в спектрофотометре, значительно выше, чем точность, которая может быть достигнута при непосредственном сравнении образцов. Отчасти это вызвано тем, что одинаковые качества двух материалов скорее исключение, чем закономерность. Высокая точность приборов объясняется главным образом способом сравнения двух частей светового поля на абсолютно темном фоне в условиях использования максимальных способностей глаза: глаз быстро адаптируется к уровню освещенности прибора, если перед этим он не подвергался воздействию довольно яркого света. При такой адаптации глаз приобретает максимальную чувствительность к различию яркости обеих частей поля. Кроме того, глаз адаптируется к цвету поля таким образом, что различие в цветовом тоне сильно преувеличивается, и цветовые тона, которые на самом деле весьма близки, будут в этих условиях существенно различаться.

Это явление аналогично тому, которое имеет место, когда тени, отбрасываемые двумя источниками независимо от их цветового различия, стремятся приобрести дополнительные цветовые тона. При полном равенстве полей этот эффект исчезает; следовательно, чувствительность при балансе резко возрастает. Таким же образом разбаланс по насыщенности между двумя половинами поля приводит к появлению дополнительных цветов на обеих половинах, даже когда свет в обоих каналах отличается только по насыщенности. Добавление белого света в один канал при сбалансированном поле, обе половины которого были перед этим зелеными, обычно вызывает розоватый цвет этой половины. Этот эффект также увеличивает чувствительность в точке равновесия (поэтому требуется большой опыт для работы с такими приборами). Следует также обратить внимание на тот факт, что у наблюдателя создаются значительно более благоприятные условия при непрерывном сравнении, нежели при ступенчатом; это также говорит в пользу приборной техники.

Степень точности при оценке цвета

Необходимо сказать несколько слов о том, какая точность требуется при измерении цвета. Глаз при наиболее выгодных условиях наблюдения в состоянии обнаружить очень малые цветовые различия, которые могут быть измерены лишь с помощью наилучших колориметрических измерений. Без сомнения, различия по цвету, которые может определить эксперт между двумя достаточно идентичными листами бумаги, значительно меньше различий, которые можно путем расчетов определить с помощью спектрофотометрической кривой. С другой стороны, различия в цвете между двумя идентичными листами бумаги, расположенными на слабо

отличающихся фонах, велики по сравнению с точностью обычного метода определения цвета с помощью набора эталонов. На самом деле, при большом различии фона разница в восприятии образцов будет гораздо больше, чем погрешность, с которой образец может быть оценен только по памяти. Поэтому точность в каждом конкретном случае сильно зависит от целевого назначения измерений. Овощи обычно не взвешиваются с точностью до 0,1 *г*, хотя 0,1 *г* — очень важная величина при взвешивании платины.

В связи с вопросами точности следует вкратце рассмотреть вопрос о колориметрических и спектрофотометрических измерениях, выполняемых каким-либо иным приемником, чем глаз. Общие принципы таких измерений уже были рассмотрены. Вероятно, опасно обобщать, особенно если эти обобщения включают в себя предположение, что данная область науки не может претерпевать изменений. Тем не менее в большинстве случаев можно установить, что фотоэлектрические и другие подобные измерения принципиально менее точны, чем аналогичные измерения, выполненные опытными наблюдателями[1]. Фотоэлектрические приборы удобны, экономичны и дают хорошую повторяемость результатов, если они качественно разработаны и надежны в эксплуатации. За редким исключением, именно это является их основными качествами, а не повышенная точность. Тот факт, что два прибора дают одинаковые отсчеты, в то время как два наблюдателя не могут составить единого мнения, не является свидетельством точности приборов. Аналогично обстоит дело и с визуальными спектрофотометрами: ни один из них не может быть таким же точным, как наблюдатель, даже если заранее известно равенство цветов для спектрально различных образцов. С другой стороны, следует удивляться тому, что фотоэлектрические колориметры прямого отсчета до сих пор не получили широкого применения при относительной простоте их конструкции и большом удобстве в эксплуатации[2]. Колориметрические измерения с ограниченной точностью удовлетворяют требованиям, которые ставятся при решении многих практических задач. Производственные допуски на цвет обычно по необходимости значительно шире, чем воспринимаемые различия.

---

[1] Современные фотоэлектрические колориметры и компараторы цвета значительно превосходят по точности, скорости и простоте своей работы колориметры визуального типа. В то же время необходимо подчеркнуть, что весьма трудно создать фотоэлектрический прибор, который по своей чувствительности к малым цветовым различиям превосходил бы глаз человека. Такие приборы — компараторы цвета— разработаны лишь в последнее время. См. А. И. Рымов, Д. А. Шкловер, Светотехника, № 10, 1961.— *Прим. ред.*

[2] В настоящее время разработаны и широко используются различные типы фотоэлектрических колориметров для цветовых измерений. Некоторые сведения о таких приборах, а также колориметрах визуального типа можно найти в книгах [2] и [3] (см. список дополнительной литературы).— *Прим. ред.*

ГЛАВА XIII

Спецификация цвета

Слово «спецификация» означает или, во всяком случае, включает в себя точное описание. С вопросом спецификации цвета связан ряд важных проблем, которые будут изложены ниже.

Содержание термина «спецификация»

Определение цвета, сделанное Американским оптическим обществом, основывается на психофизических величинах и в настоящее время является общепризнанным. В связи с тем что для полного описания восприятия цвета материальных образцов потребовалось бы множество систем, легче рассматривать лишь свет от объекта, нежели сам объект. Ввиду того что цветовое зрение наблюдателей различно, проще иметь дело со стандартным наблюдателем и с математическим расчетом, результаты которого называются цветом. При таком определении связь между спецификацией и восприятием может быть выражена эмпирически соотношениями, справедливыми лишь для специфичных условий наблюдения. Применение слова «цвет» в этом смысле покажется странным тем, кто работает в этой области, потому что слово «цвет» в повседневной жизни имеет совсем другой смысл.

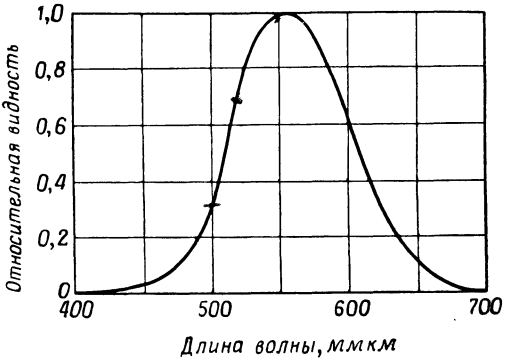
Предстоящий разбор целесообразно начать с наиболее серьезной и научно обоснованной системы, признанной Американским оптическим обществом. Как уже говорилось, в этой системе цвет определяется как чисто психофизическая концепция путем расчета физических стимулов относительно стандартного наблюдателя, способного реагировать только на цветовой тон, насыщенность и светлоту и лишь определенным образом.

Колориметрическая система МКО

Международная комиссия по освещению установила международные стандарты кривой видности, кривых смешения цвета для трех воображаемых основных цветов, распределение энергии одного основного и нескольких дополнительных источников света и ряд

других необходимых данных. Эта система носит название международной колориметрической системы МКО — 1931 г.

Кривая видности стандартного наблюдателя приведена на фиг. 13.1, а ее ординаты — в табл. 13.1.



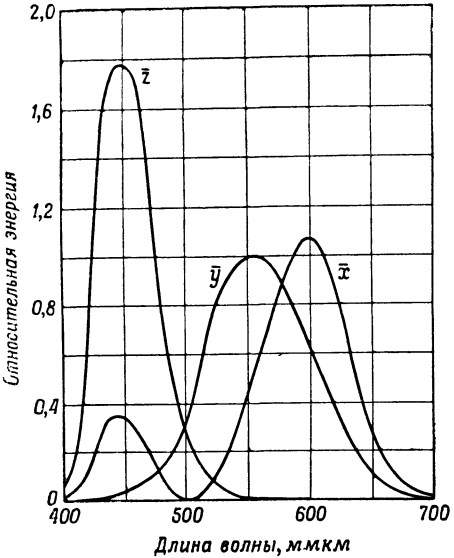
Ф и г. 13.1. Кривая относительной видности монохроматических излучений.

Количества трех основных цветов в системе МКО, необходимые для воспроизведения единичных величин энергии для длин волн от

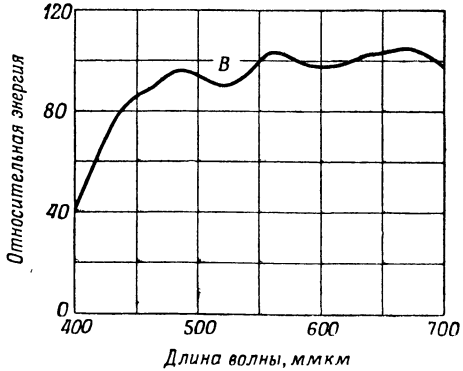
Таблица 13.1

Значения относительной видности монохроматических излучений

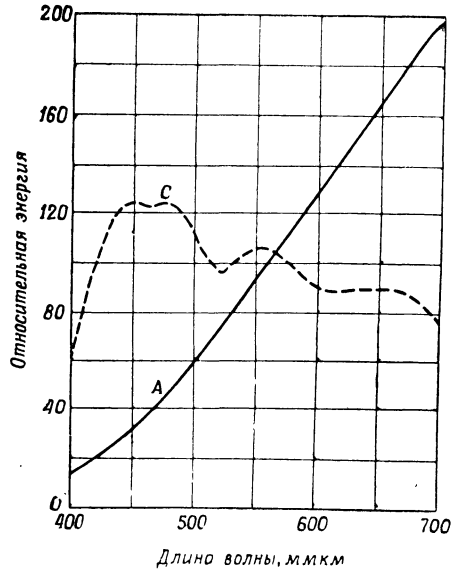
Длина волны, *ммкм*	Относительная видность	Длина волны, *ммкм*	Относительная видность	Длина волны, *ммкм*	Относительная видность
380	0,0001	520	0,7100	660	0,0610
390	0,0001	530	0,8620	670	0,0320
400	0,0004	540	0,9540	680	0,0170
410	0,0012	550	0,9950	690	0,0082
420	0,0040	560	0,9950	700	0,0041
430	0,0116	570	0,9520	710	0,0021
440	0,0230	580	0,8700	720	0,0010
450	0,0380	590	0,7570	730	0,0005
460	0,0600	600	0,6310	740	0,0003
470	0,0910	610	0,5030	750	0,0001
480	0,1390	620	0,3810	760	0,0001
490	0,2080	630	0,2650	770	0,0000
500	0,3230	640	0,1750	780	0,0000
510	0,5030	650	0,1070		



Ф и г. 13.2. Количества трех основных цветов в системе МКО, необходимые для воспроизведения единичных энергий монохроматических излучений.



Ф и г. 13.3. Кривая спектрального распределения энергии для стандартного колориметрического источника света B (один из стандартных источников МКО).



Ф и г. 13.4. Кривые спектрального распределения энергии для двух других стандартных колориметрических источников A и C системы МКО.

380 до 780 *ммкм*, приведены на фиг. 13.2, а соответствующие им числовые значения — в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Значения удельных координат цвета для стандартного наблюдателя (система МКО)

Длина волны, *ммкм*	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	Длина волны, *ммкм*	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
380	0,0014	0,0000	0,0065	590	1,0263	0,7570	0,0011
390	0,0042	0,0001	0,0201	600	1,0622	0,6310	0,0008
400	0,0143	0,0004	0,0679	610	1,0026	0,5030	0,0003
410	0,0435	0,0012	0,2074	620	0,8544	0,3810	0,0002
420	0,1344	0,0040	0,6456	630	0,6424	0,2650	0,0000
430	0,2839	0,0116	1,3856	640	0,4479	0,1750	
440	0,3483	0,0230	1,7471	650	0,2835	0,1070	
450	0,3362	0,0380	1,7721	660	0,1649	0,0610	
460	0,2908	0,0600	1,6692	670	0,0874	0,0320	
470	0,1954	0,0910	1,2876	680	0,0458	0,0170	
480	0,0956	0,1390	0,8130	690	0,0227	0,0082	
490	0,0320	0,2080	0,4652	700	0,0114	0,0041	
500	0,0049	0,3230	0,2720	710	0,0058	0,0021	
510	0,0093	0,5030	0,1582	720	0,0029	0,0010	
520	0,0633	0,7100	0,0782	730	0,0014	0,0005	
530	0,1655	0,8620	0,0422	740	0,0007	0,0003	
540	0,2904	0,9540	0,0203	750	0,0003	0,0001	
550	0,4334	0,9950	0,0087	760	0,0002	0,0001	
560	0,5945	0,9950	0,0039	770	0,0001	0,0000	
570	0,7621	0,9520	0,0021	780	0,0000		
580	0,9163	0,8700	0,0017				

В литературе, приведенной в конце книги, читатель может найти подробный разбор этих вопросов и более точные цифровые данные[1]).

Спектральное распределение энергии для одного стандартного источника белого света (типа *B*) показано на фиг. 13.3, а для типов *A* и *C* — на фиг. 13.4. Численные значения для этих кривых приведены в табл. 13.3.

[1]) Подробные сведения о международной колориметрической системе МКО и необходимые для расчетов табличные данные приведены в работах [4,8] списка дополнительной литературы.— *Прим. ред.*

Таблица 13.3

Данные спектрального распределения энергии стандартных источников света *A*, *B* и *C* системы МКО

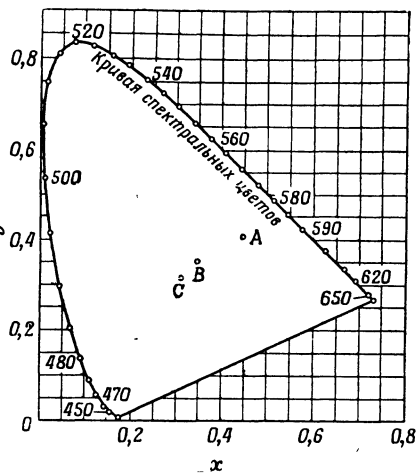
Длина волны, *ммкм*	E_A	E_B	E_C	Длина волны, *ммкм*	E_A	E_B	E_C
380	9,79	22,40	33,00	590	121,73	99,20	93,20
390	12,09	31,30	47,40	600	129,04	98,00	89,70
400	14,71	41,30	63,30	610	136,34	98,50	88,40
410	17,68	52,10	80,60	620	143,62	99,70	88,10
420	21,00	63,20	98,10	630	150,83	101,00	88,00
430	24,67	73,10	112,40	640	157,98	102,20	87,80
440	28,70	80,80	121,50	650	165,03	103,90	88,20
450	33,09	85,40	124,00	660	171,96	105,00	87,90
460	37,82	88,30	123,10	670	178,77	104,90	86,30
470	42,87	92,00	123,80	680	185,43	103,90	84,00
480	48,25	95,20	123,90	690	191,93	101,60	80,20
490	53,91	96,50	120,70	700	198,26	99,10	76,30
500	59,86	94,20	112,10	710	204,41	96,20	72,40
510	66,06	90,70	102,30	720	210,36	92,90	68,30
520	72,50	89,50	96,90	730	216,12	89,40	64,40
530	79,13	92,20	98,00	740	221,66	86,90	61,50
540	85,95	96,90	102,10	750	227,00	85,20	59,20
550	92,91	101,00	105,20	760	232,11	84,70	58,10
560	100,00	102,80	105,30	770	237,01	85,40	58,20
570	107,18	102,60	102,30	780	241,67	87,00	59,10
580	114,44	101,00	97,80				

Стандартный цветовой график МКО

Рекомендуемый метод графического изображения результатов, полученных при расчете цветности любого излучения, показан на фиг. 13.5 и известен под названием стандартный цветовой график. Нанесенные на графике точки, соединенные кривой, соответствуют цветностям монохроматических излучений, найденным по кривым смешения, изображенным на фиг. 13.2. Харди и его сотрудники разработали удобный и быстрый метод для расчета цветности по спектрофотометрическим данным, опубликованный в справочнике по колориметрии Массачусетского технологического института [53] [1]. Сущность метода заключается в применении особых длин

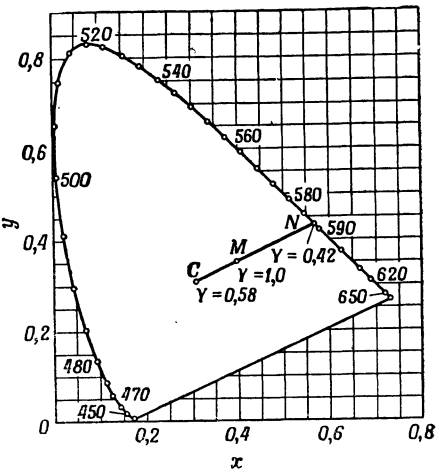
[1] Описание расчета цвета методом избранных ординат приведено в работах [4,8] списка дополнительной литературы.— *Прим. ред.*

волн, выбранных так, что при суммировании относительных значений энергии при этих длинах волн для каждого основного цвета суммы будут пропорциональны координатам цвета. Таким способом удается избежать утомительных расчетов, связанных с умножением



Ф и г. 13.5. Цветовой график МКО.

Точки на графике соответствуют стандартным источникам *A*, *B* и *C*. Кривая показывает геометрическое место точек, соответствующих видимым спектральным излучениям. На прямой, соединяющей крайние точки спектральных цветов, расположены пурпурные цвета.



Ф и г. 13.6. Точка *M* соответствует цветности источника, полученного при смешении излучения источника *C* и света натриевого пламени *N*.

Относительная яркость *Y* этого источника и двух его составляющих показана цифрами.

спектрофотометрических характеристик образца на произведение кривых распределения энергии в спектре источника и удельных координат для каждого основного цвета с последующим определением отношений интегралов этих кривых. Весь расчет может быть выполнен за несколько минут, и если даже результат не полностью совпадает с величиной, полученной при точном интегрировании, то он достаточно точен почти для всех случаев. В указанном справочнике описан метод для 30 из 100 «избранных ординат» и приведены соответствующие таблицы.

В нашей книге речь пойдет не о техническом выполнении таких расчетов, а о характеристиках, полученных в конечном итоге такой спецификации. В результате таких расчетов будут получены величины трех координат цвета X, Y и Z.

Значения координат цвета позволяют определить величины координат цветности x, y и относительную яркость Y.

Предположим, что определенная таким образом цветность излучения изобразится на цветовом графике точкой M (фиг. 13.6). На этом же графике нанесена точка C, соответствующая освещающему источнику, относительно которого производились расчеты. Соединив точки C и M прямой и продолжив ее до пересечения с геометрическим местом точек спектральных цветов, получим точку N.

Как уже указывалось, такой модифицированный треугольник Максвелла обладает следующими свойствами: если цветности двух источников света соответствуют двум точкам внутри треугольника, то цветности, получающиеся в результате их смешения, располагаются на линии, соединяющей обе точки. Точки N и C соответствуют спектральному цвету и «белому» источнику. Любая точка, лежащая на соединяющей их линии, может быть воспроизведена смешением N и C в количествах, обратно пропорциональных отношению расстояний от этой точки до N и C, причем количество N, например, пропорционально MC, а количество C пропорционально MN. Эти обстоятельства являются основой спецификации цвета в системе МКО[1]. Длина волны, соответствующая точке пересечения линии, проведенной через точки, соответствующие цветности источника и образца, с линией спектральных цветов, названа доминирующей длиной волны, а отношение расстояний CM к CN названо чистотой цвета[2].

Так как относительная яркость Y явно зависит от условий освещения и других факторов, то ее считают самостоятельной количественной характеристикой цвета, в то время как доминирующую длину волны и чистоту цвета объединили в одно качество под названием «цветность». В разговорной речи это разделение выражается замечанием: «Эти два образца идентичны по цветности, но один ярче другого».

Спецификация по цветности и яркости для данных поверхностей или прозрачных образцов при данном освещении однозначно определяет цвет. При замене одного образца другим, имеющим тот же цвет, оба они тождественны для наблюдателя, чувствительность которого в данный момент такая же, как и стандартного наблюдателя. Такое равенство обычно сохраняется для большинства нормальных условий наблюдения, включая различие в фоне, состоянии

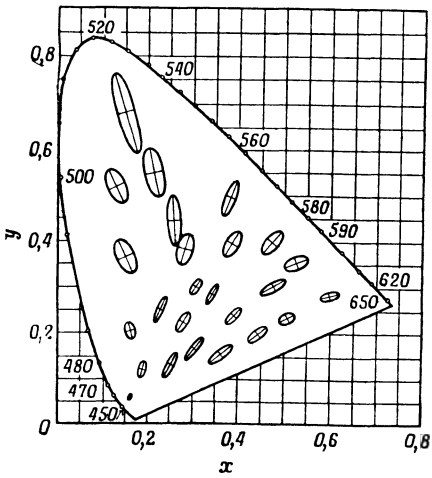
[1] Утверждение автора справедливо лишь в том случае, если под «количеством цвета» понимать величину его модуля, равного отношению его яркости (или коэффициента отражения) к относительной компоненте Y. — *Прим. ред.*

[2] Обычно под колориметрической чистотой цвета понимается величина отношения яркости монохроматического излучения к суммарной яркости монохроматического и белого излучений, необходимой для воспроизведения заданного цвета. При таком определении шкала чистоты на линиях постоянного цветового тона не будет равномерной. В американской литературе используется как понятие чистоты, приводимое автором (exitation purity), так и принятые в большинстве стран понятия колориметрической чистоты цвета (colorimetric purity).— *Прим. ред.*

адаптации и пр. Следует учитывать, что, как было показано в предыдущей главе, оно справедливо лишь для света, отраженного от образца, рассматриваемого независимо от фактуры последнего.

Расстояние в треугольнике

Если расчеты для цвета от двух разных образцов дают несколько различные значения, то к оценке этой разницы следует подходить осторожно. Одинаковым расстояниям на цветовом графике не соответствуют одинаковые визуальные различия. На самом деле было показано, что не представляется возможным построить такой цветовой график, в котором едва воспринимаемые различия цветности или пороги различения соответствовали бы одинаковому расстоянию для всего графика. Трудности в создании такого графика усугубляются тем обстоятельством, что различия по яркости тоже вызывают сдвиги воспринимаемого цветового тона и насыщенности, что не находит отражения в стандартном цветовом графике. Пренебрежение этим фактом может привести к большим ошибкам.



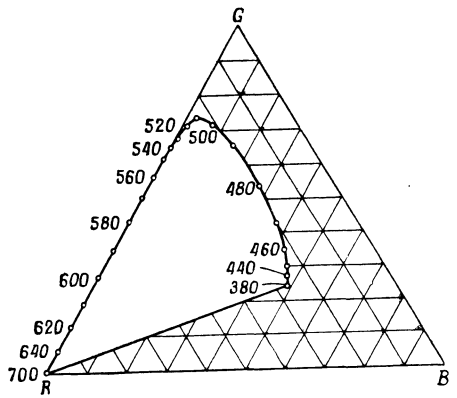
Ф и г. 13.7. Чувствительность глаза к изменениям цветности в различных участках цветового графика.

Длины осей каждого эллипса для наглядности были умножены на 10 [49, стр. 271].

Мак-Адам [46—49] исследовал различительную способность глаза в разных участках графика. В качестве иллюстрации результатов своих работ он опубликовал график, приведенный на фиг. 13.7. Каждый эллипс представляет собой геометрическое место точек, соответствующих одинаково воспринимаемым различиям относительно его центра. Для получения абсолютных значений длины осей эллипсов их надо разделить на 10, так как для наглядности длины осей были увеличены в 10 раз. Как следует из фиг. 13.7, изменение чувствительности глаза на разных участках графика достигает значительной величины и в любой точке графика чувствительность к изменению доминирующей длины волны во много раз больше чувствительности к изменению чистоты цвета[1]. Эллипсы

[1] Так как доминирующая длина волны и чистота цвета измеряются в совершенно различных единицах, то сравнение чувствительности глаза к их изменению, проводимое автором, не может быть признано правомочным.— *Прим. ред.*

были получены при непосредственном определении *порогов различения* в разных направлениях от каждой точки, отмеченной на графике. Вопрос об относительном восприятии цветовых различий в разных участках цветового графика не был рассмотрен. Вполне возможно, что пороги различения в разных участках графика психологически вполне сравнимы. Однако таких сравнений никто не проводил. Определение величины порогов различения *по яркости* в этой работе также не проводилось[1]. В этой работе также доказано, что невозможно получить плоский цветовой график, на котором бы геометрические места точек, соответствующих одинаковому числу порогов относительно любой точки на графике, изображались окружностями одинакового радиуса.



Ф и г. 13.8. Равноконтрастный цветовой график, разработанный Джаддом [33, стр. 44].

Возможно, однако, найти приближенное решение, которое гораздо ближе к такому идеальному графику, чем график *xy*. Один из таких графиков был предложен Джаддом [33] (фиг. 13.8) и назван равноконтрастным графиком. В этом графике, точнее чем в любом из существующих в настоящее время, Джадд выполнил условие, что одинаковые расстояния имеют одинаковую значимость, хотя бы для цветности.

При построении треугольника Джадд воспользовался приемом, иллюстрирующим одну из возможностей расчетной колориметрии. Равномерность графика зависит от выбора основных цветов системы. Так как любой новый основной цвет может быть выражен через три основных цвета системы МКО, то можно предположить, что он эквивалентен смеси этих трех цветов в расчетных соотношениях. Эти же рассуждения справедливы и для двух других новых основных цветов. В результате может быть определена система новых основных цветов чисто расчетным способом без получения новых данных.

---

[1] В качестве критерия порога различения в работе Мак-Адама использовалась величина средней квадратичной погрешности при установках на цветовое равенство, и поэтому измеренные им величины порогов для различных областей цветового графика вполне могут быть сопоставлены друг с другом. В более поздней работе Мак-Адама и Брауна были измерены пороги также при одновременном изменении цветности и яркости.— *Прим. ред.*

Изменится лишь распределение точек на графике. Тщательно изучая возможную деформацию графика, можно получить вполне хорошую аппроксимацию однородных различий по цветности на разных участках графика. С помощью такого приема, который можно назвать трансформацией координат, возможно создать систему для любого частного случая, но трудности, возникающие при этом, должны быть оправданы конечной целью[1]. Для ознакомления с соответствующим математическим аппаратом читатель может обратиться к литературе, указанной в конце книги.

Связь с другими системами основных цветов

Подобным образом можно, конечно, связать с системой МКО экспериментальные данные, полученные при использовании любой системы основных цветов путем расчета координат и нанесения их на график. Их попарные смеси будут лежать на прямых линиях, соединяющих эти точки. Таким образом внутри графика МКО образуются новый треугольник смешения и соответствующая сетка координат. Переход от одних координат к другим можно легко осуществить, нанося точку относительно внутреннего треугольника и отсчитывая параметры в координатах МКО. Как будет показано ниже, такие сетки имеют особое значение при использовании системы МКО для расчета субтрактивного смешения красок, для которого цвета попарных смесей не лежат на прямых линиях.

Результаты измерений методами визуальной колориметрии зависят от особенностей цветового зрения наблюдателя, работающего с прибором, могущих вызывать определенные отклонения от расчетных величин. Эти отклонения можно рассматривать как ошибку в спецификации; они дают также возможность проверить зрение наблюдателя. Колориметрические системы спецификаций относительно произвольных основных цветов не поддаются интерпретации, если нет точных данных *о спектральном распределении энергии этих реальных источников* и данных, характеризующих зрение наблюдателя. Предположение, что усредненные показания любой небольшой группы наблюдателей подобны показаниям стандартного наблюдателя, не имеет законного основания. Лучше не делать никаких предположений об отношении стандартного наблюдателя к зрению реального наблюдателя. Стандартный наблюдатель, свойства которого были установлены международным согла-

---

[1] Как было показано Райтом, цветовой график Джадда лишь приближенно удовлетворяет условиям равноконтрастности. Несмотря на большое число работ, посвященных вопросу создания равноконтрастной колориметрической системы, этот вопрос в настоящее время не может считаться полностью решенным.— *Прим. ред.*

шением, имеет значение лишь как стандарт сравнения. Вполне возможно, что данные о нем существенно отличаются от средних статистических данных, которые можно было бы получить для всех наблюдателей с нормальным зрением. Нельзя утверждать, что расчетное равенство цветов справедливо с высокой степенью точности для любого наблюдателя, если имеется существенная разница в спектральном распределении энергии рассматриваемых образцов.

Об этом факте упоминалось не раз. Он имеет большое значение при выборе основных цветов для любого метода прямой колориметрии и важен также для системы эталонов сравнения. В заключение можно сказать, что согласованность между наблюдателями при сравнении образцов будет тем лучше, чем ближе спектральные характеристики образцов. В предельном случае при идентичных спектральных характеристиках будет полная согласованность между всеми наблюдателями, включая аномальные случаи, а также случаи отсутствия цветового зрения. В случае же, если спектр одного образца непрерывный, а другого — линейчатый, состоящий из нескольких монохроматических линий, рассогласования будут наибольшими.

Специализированные системы эталонов

Из вышеизложенного следует, что высокой точности результатов оценки, приемлемых для всех наблюдателей, можно добиться с помощью системы эталонов с таким же распределением энергии в спектре, что и образцы. Эту систему можно связать с любой колориметрической системой типа МКО, так как цветовое зрение наблюдателя в таких случаях не является переменным фактором.

Таких систем было разработано много, но реализованы далеко не все, так как они возникали более или менее стихийно в связи с решением специфических задач, не имеющих большого практического значения. Автор считает, что такого направления следует придерживаться при осуществлении производственного контроля. Многие люди, незнакомые со сложностью науки о цвете, испытывают затруднения при оценке цвета своей продукции непосредственно по государственным стандартным эталонам. В большинстве случаев такой контроль был бы гораздо точнее, если применять специальные серии эталонов, перекрывающие предполагаемые различия цвета продукции. Маловероятно, что расчетный метод может дать более точные результаты, если спектральные характеристики эталонов и образцов подобны. При желании с помощью системы МКО не трудно установить зависимость между такой серией эталонов и государственными стандартами. Наименьшие допуски, в пределах которых может изменяться цвет продукции или

подобран цвет, в значительной мере зависят от точности, с которой тренированный наблюдатель в соответствующих условиях производит сравнение двух почти идентичных образцов.

Спецификация цветовой температуры

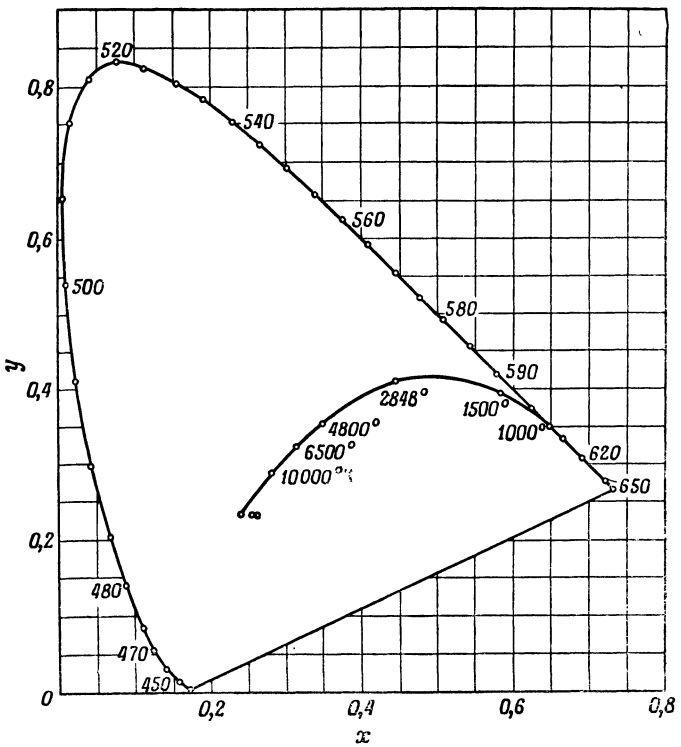
Несколько отличную от рассмотренных выше систему спецификации можно получить, если взять за основу понятие о цветовой температуре. Последовательное изменение температуры абсолютно черного излучателя дает спектральные распределения энергии излучения, которые могут быть рассчитаны упомянутыми выше методами. Серия таких распределений, полученная для лампы накаливания с вольфрамовой нитью, показана на фиг. 3.3. Лампа включалась сначала на низкое напряжение, а затем ее напряжение постепенно повышалось. Самая высокая температура, которая может быть получена для вольфрама, равна примерно 3700° К; при бóльших температурах вольфрам плавится.

Для удобства сравнения распределений энергии при разных температурах следует перечертить график, приняв при какой-либо одной длине волны энергию источника за 100% независимо от температуры. Это выполнено на фиг. 3.2.

Каждая кривая распределения энергии излучения соответствует одному цвету, который меняется от темно-красного — оранжевого — желтого — белого до синего. Это дает на графике МКО серию точек, лежащих на плавной кривой (фиг. 13.9).

Следует подчеркнуть, что источником этой серии точек является строго определенное семейство спектральных распределений энергии. Но каждый цвет, полученный при соответствующем распределении энергии, может образоваться также от многих других распределений энергии, однако все они определяются одной точкой на графике МКО. Поэтому термин «цветовая температура» не означает то, что свет обладает таким же *распределением энергии*, как и излучение абсолютно черного тела, а лишь то, что *цвет искомого света* равен или близок к цвету абсолютно черного тела при такой же температуре. Эти понятия нетождественные, но оба встречаются в литературе. Таким образом цветовая температура определяется как температура абсолютно черного тела, при которой оно совпадает по цвету с данным излучением. Однако применение этого термина часто вводит в заблуждение. Очевидно, красный образец, который освещается источником света с цветовой температурой 5000° К, не содержащим красного излучения, будет выглядеть совсем по-другому, чем при освещении источником, представляющим собой нагретое до этой температуры абсолютно черное тело с бóльшим содержанием красного. Излучение источников света с прерывистым спектром не может быть достаточно полно охарактеризовано

понятием *цветовая температура.* Ряд цветовых температур имеет то преимущество, что он достаточно хорошо аппроксимируется многими практически применяемыми источниками света, такими, как обычная лампа накаливания, и что вполне возможно создать реальные эталоны для сравнительной оценки различных источников.



Ф и г. 13.9. Линия цветностей абсолютно черного тела при различных температурах.

Шкала цветовых температур может служить в качестве системы эталонов применительно к источникам света, и ей пользуются при решении таких задач.

Тинтометр Лавибонда

Для прозрачных образцов были предложены различные системы эталонов. Наиболее известной и наилучшим образом стандартизованной системой являются, вероятно, тинтометр Лавибонда [42]. Это устройство представляет собой субтрактивный колориметр,

в котором оценка искомого образца производится путем выравнивания двух лучей за счет введения в канал сравнения стеклянных светофильтров.

Цвет образца определяется теми светофильтрами, с помощью которых было достигнуто равенство. Если кривые спектрального пропускания светофильтров и образцов близки, то для решения подобных задач метод исключительно хорош. Он свободен от недостатка, характерного для монохроматической колориметрии, т. е. не зависит от наблюдателя, и, кроме того, здесь можно применять светофильтры с определенными спектральными кривыми поглощения. Недостатки системы — ступенчатость измерений и сложный метод компенсации, которая осуществляется при полной темноте. При этом глаз приводится в состояние максимальной чувствительности к цветовым различиям, что редко бывает в обычных условиях, поэтому между цветами образцов, видимыми в таких и в повседневных условиях, мало общего. Техника проведения опытов сложная и требует особых навыков. Однако преимущество метода заключается еще и в том, что результаты измерений могут быть связаны с системой спецификации МКО или с другой, ей подобной.

Система Манселла

Несколько иной подход к решению этой проблемы применен в работе Манселла [62]. Он предложил создать серию окрашенных бумаг (выкрасок) с одинаковыми вариациями цветового ощущения по всем направлениям цветового пространства. Манселл в своей работе не основывался на колориметрических характеристиках цвета, а понимал цвет лишь как ощущение при более или менее стандартизованных условиях наблюдения. На такой основе он и его сотрудники сумели создать атлас [62], в котором собраны образцы цветов с приближенно равными ступенями изменения цвета, охватывающие подавляющую часть области возможных отражающих цветов.

Три переменные величины цвета они обозначали специальными терминами hue, chroma, value. Эти термины приблизительно соответствуют современным определениям: «цветовой тон», «насыщенность» и «светлота». Образцы были сгруппированы в пространственное цветовое тело, при этом ахроматические цвета (от черного до белого) располагались по вертикальной оси. Вокруг этой оси под равными углами они расположили все цветовые тона, принимая насыщенность за расстояние от оси при всех частных уровнях светлоты. В опубликованном цветовом атласе выкраски располагались в различных сечениях цветового пространства как плоскостями, проходящими через ахроматическую ось, так и плоскостями, перпендикулярными к ней.

При определении цвета искомого образца этот цвет сравнивается с выкрасками атласа и определяются ближайшие по цвету выкраски. Цвет образца в этом случае можно выразить в цифровых индексах по шкалам тела цветового пространства Манселла.

Оригинал атласа был создан на основе ряда допущений, в результате которых нельзя считать принцип расположения выкрасок ни психологическим, ни психофизическим в том смысле, как мы теперь применяем эти термины. Так, например, определение рядов с постоянным цветовым тоном при различных уровнях насыщенности производилось путем установки образца на быстро вращающемся диске с добавлением различного количества белого и черного. Частота вращения диска была выше той, при которой глаз видит мелькания. Видимые в таких условиях цвета воспроизводились затем пигментами, и полученные результаты считались *постоянными* по цветовому тону. Такой ряд, очевидно, должен соответствовать прямой линии на цветовом графике, т. е. должен рассматриваться как психофизический[1)].

В 1943 г. специальный комитет Американского оптического общества исследовал расположение цветов в системе Манселла и рекомендовал средние величины координат цвета его образцов. Результаты исследования цвета атласа Манселла показывают, что он может рассматриваться как наилучшее приближение к цветовому телу для отражающих цветов, основанному только на цветовых ощущениях.

Следует, однако, еще раз подчеркнуть, что эти маленькие выкраски с матовой поверхностью представляют собой лишь один тип поверхностей с определенными кривыми спектрального распределения энергии и поэтому мало подходят для оценки образцов с произвольной фактурой.

Система Оствальда

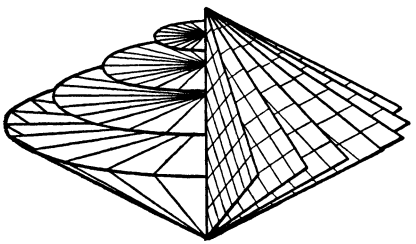
Почти одновременно с Манселлом в Германии Оствальд разработал систему такого же типа. Она была основана на ряде теоретических взглядов о цвете, которых придерживался Оствальд. Он называл полными цветами (максимально насыщенными цветами) такие, энергия которых равномерно распределялась в областях спектра, ограниченных дополнительными длинами волн, и предполагал, что такое распределение энергии дает наибольшую чистоту цвета. Он считал, что два других параметра цвета суть белое и чер-

---

[1)] В действительности линии постоянного цветового тона системы Манселла, нанесенные на цветовой график МКО, оказываются прямолинейными лишь для некоторых цветовых тонов, а в общем случае имеют заметную кривизну.— *Прим. ред.*

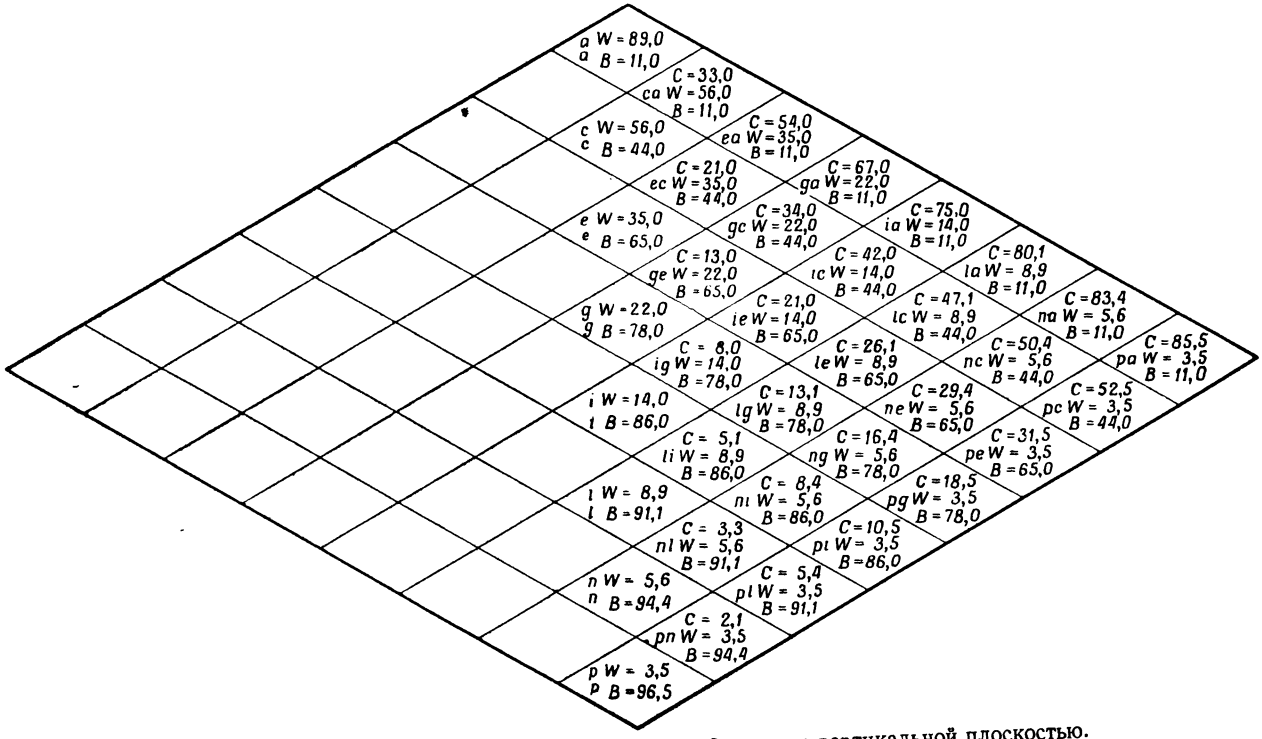
ное, и выдвинул теорию, что сумма полного цвета плюс белое и плюс черное равна единице для любого цвета. При изготовлении бумажных эталонов необходимо было использовать реальные пигменты, а они так далеки от теоретических, что получалась совсем иная система, чем предполагалось по теории Оствальда. Расхождения теоретических и реальных цветов, использованных в опубликованном атласе, были исследованы Фоссом, Никкерсон и Гренвиллом, а результаты исследований были опубликованы в работе [19].

В атласе Оствальда полные цвета расположены по окружности таким образом, чтобы дополнительные цвета находились на противоположных участках. Круг служит основанием двух конусов, вершины которых соединены прямой линией, являющейся осью черно-белого ряда (фиг. 13.10). При сечении цветового пространства вертикальной плоскостью образуются два треугольника, общая сторона которых является осью черно-белого ряда, как показано на фиг. 13.11. Так как дополнительные цветовые тона расположены на окружности диаметрально противоположно, то эта закономерность сохраняется и в каждой паре треугольников. В любом таком сечении вдоль одной стороны треугольника от вершины к основанию (ахроматическая ось) располагается ряд с увеличением белого и уменьшением полного цвета, а вдоль другой стороны — ряд с увеличением черного и уменьшением полного цвета. Допущение Оствальда заключается в предположении, что пигменты соответствуют идеальным красителям. Фосс, Никкерсон и Гренвилл показали, что такая система на реальных пигментах создана быть не может.



Ф и г. 13.10. Графическое изображение системы Оствальда.

Однако система эта ценна в другом отношении. Как показали вышеупомянутые авторы, вертикальные ряды цветового пространства Оствальда представляют собой теоретически чистые ряды цветов постоянной цветности с меняющимися относительными яркостями. При разбавлении белым цветом получаются ряды, близкие к рядам постоянной чистоты. Поэтому потенциально цветовое пространство Оствальда представляет собой систему эталонов, сгруппированных скорее по психофизическим, чем по психологическим параметрам, т. е. по доминирующей длине волны, чистоте цвета и относительной яркости, а не по цветовому тону, насыщен-



Ф и г. 13.11. Сечение цветового пространства Оствальда вертикальной плоскостью.

Цифры, приведенные в каждой клетке, означают процентное содержание: *W* — белого, *B* — черного, *C* — полного цвета. Левая половина диаграммы должна точно соответствовать правой, а полный цвет левой половины является дополнительным к полному цвету правой.

ности и светлоте[1]). Такое расположение имеет свои преимущества, особенно если его связать с системой МКО. Кроме очевидного преимущества, что это расположение является хорошей иллюстрацией психофизической системы, оно еще и построено по переменным, наиболее часто встречающимся в практике. Например, какой-либо поверхностный цвет, освещаемый источником при разных интенсивностях, физически соответствует вертикальному ряду цветового пространства. Растровая печать одной краской соответствует ряду смешения полного цвета с белым. Основной недостаток системы Оствальда заключается в изображении цветов предельных насыщенностей в форме окружности постоянной чистоты. Теоретически и практически неправильно допускать, что краски наибольшей возможной насыщенности эквивалентны по производимому ими ощущению.

Системы Манселла и Оствальда выявили замечательные возможности систем эталонов для поверхностных цветов, сгруппированных соответственно по психологическим и психофизическим принципам[2]).

Текстильные цветовые таблицы

Хорошим примером, подчеркивающим необходимость создания специальных систем и иллюстрирующим, какую пользу можно из них извлечь, являются ежегодные цветовые таблицы, выпускаемые Американской ассоциацией текстильных цветных таблиц. Эти таблицы состоят из новейших текстильных образцов, стандартизованных таким образом, что все выпуски таблиц подобны друг другу. Каждому цвету дается определенное наименование, и эти цвета с их наименованиями служат стандартами на текущий год. Для нас важным моментом является то, что каждый цвет представлен на ткани с матовой и сатинированной отделкой, так что позволяет производить оценку искомых образцов с вполне удовлетворительной точностью. В этих таблицах (основанных на системе Оствальда) представлены также образцы с глянцевыми и матовыми бесструктурными поверхностями.

Хотя и существуют системы эталонов, соответствующие всевозможным вариациям их расположений, однако не следует считать, что имеющиеся системы удовлетворяют все нужды.

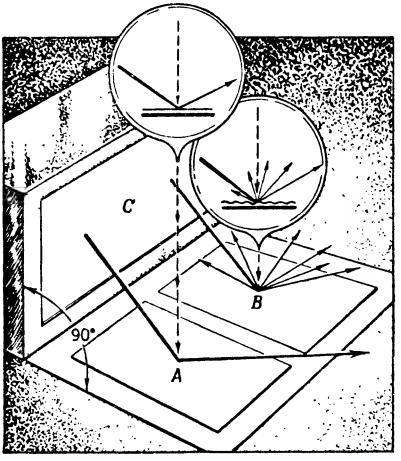
---

[1]) Нельзя считать, что атлас Оствальда содержит эталоны, сгруппированные по психофизическому принципу. Так, например, в атласе Оствальда принята логарифмическая шкала коэффициентов отражения, что приближает ее к шкале светлот атласа Манселла.— *Прим. ред.*

[2]) В Советском Союзе оригинальный атлас цветов разработан проф. Е. Б. Рабкиным. — *Прим. ред.*

Общие ограничения

Задача спецификации цвета состоит либо в контроле продукции, либо в простом описании в литературных целях. В любом случае считают, что два образца, специфицированные одинаково, будут казаться одинаковыми по цвету. Совершенно ясно, что это невыполнимо, так как любой метод спецификации в силу необходимости подразумевает какое-то определенное распределение энергии источника освещения. Но даже при дополнительной спецификации источника такой вывод весьма неточен, если физические свойства двух сравниваемых образцов не идентичны. Эти рассуждения легко можно подтвердить простым примером, но его принципиальное содержание остается справедливым для всех случаев. Предположим, что два образца бумаги с селективным поглощением идентичны, за исключением степени глянца поверхности: глянец у одного несколько больше, чем у другого. Если эти образцы расположить на обычном фоне, то они должны отражать свет, дошедший до их поверхностей от близлежащих предметов. Допустим для наглядности, что один образец глянцевый, а другой матовый и что вертикально под прямым углом к ним установлена равномерно освещенная красная поверхность, как показано на фиг. 13.12. Рассматривая образцы сверху так, чтобы красная поверхность не была видна, можно заметить, что матовый образец отражает существенную часть красного света в направлении глаза, в то время как на глянцевом образце этого не видно. Глянцевая поверхность зеркально отражает почти весь красный свет, а матовая отражает его диффузно, поэтому в глаз наблюдателя попадает заметная доля красного света.



Ф и г. 13.12. Два образца *A* и *B* имеют соответственно глянцевую и матовую поверхности. Эти образцы освещаются рассеянным светом помещения и светом, отраженным от красной поверхности *C*.

Если же имеется какая-то разница между селективными свойствами двух образцов, т. е. если спектрофотометрические кривые равных по цвету образцов различны, то они могут казаться разными по цвету при обычном фоне просто потому, что отражение от этих поверхностей, вызванное близлежащими цветными объектами, может быть различное.

Поэтому строго и логично следует считать, что любая спецификация цвета ограничена определенными условиями и не может дать универсального решения проблемы контроля и описания цвета, за исключением случая двух физически идентичных образцов с одинаковым селективным поглощением по всем длинам волн спектра.

Тем не менее польза колориметрических спецификаций весьма большая. Но такие спецификации должны сопровождаться более подробными сведениями об использованных материалах и условиях, в которых производились измерения. Более того, в случаях, когда спецификация относится к материалам, резко отличающимся от испытуемых образцов, не следует требовать высокой точности. Какая бы методика или система ни применялась, такие результаты лишь в лучшем случае будут иметь хорошее приближение.

ГЛАВА XIV

Цветовые различия и названия цветов

Выражение «цветовые различия» имеет такое же множество значений, как и само слово «цвет». Для некоторых слово «цвет» означает цветовой тон и слово «различие» подразумевает разницу только цветовых тонов. Для других понятие «цвет» охватывает всевозможные свойства цвета и при этом оцениваются все визуальные различия между двумя объектами. Мы ограничим свое рассмотрение только вполне определенными рамками, исключив все переменные, кроме цветового тона, насыщенности цвета и светлоты (или яркости).

Значение понятия «цветовое различие»

Даже при этих ограничениях, однако, необходимо более подробно рассмотреть, что подразумевается под цветовыми различиями. Различия, которые наблюдатель регистрирует с помощью фотометра, имеют совсем другую природу, чем те, которые он видит, рассматривая репродукцию пейзажа, сфотографированного им ранее. В первом случае он использует все возможности своего глаза для непосредственного сравнения при наиболее благоприятных условиях, во втором — делает сопоставление по памяти между фотографией и натурой, наблюдаемыми в разных условиях.

Неопределенность понятия «цветовое различие» породила ряд различных формулировок. Физик-фотометрист говорит «едва воспринимаемое различие» или «едва заметное различие». Автору первое выражение кажется более подходящим, так как оно лучше выражает наименьшую различимую разность при наиболее благоприятных условиях. В данной книге выражение «едва воспринимаемое различие» или «пороговое различие» будет применяться в указанном выше смысле, а понятие «заметное различие» мы будем относить к значительно большим разностям, которые привлекают внимание наблюдателя в обычных условиях, а не только при особых обстоятельствах.

Чтобы охватить все обычные значения, которые могут определяться этим довольно расплывчатым термином, необходимо ввести дополнительные определения, учитывающие отношение наблюда-

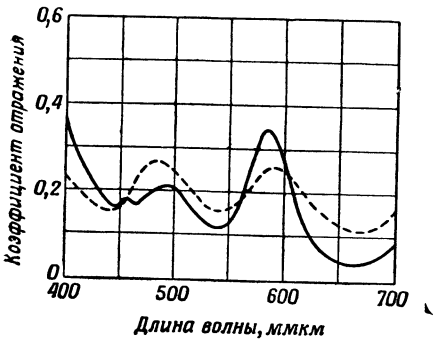
теля к рассматриваемому объекту. В этом случае можно говорить о «допустимом различии». Когда будущий покупатель знакомится с изменениями цвета, которые могут иметь место в готовой продукции, он заинтересован в том, чтобы цвет продукции был максимально постоянным и чтобы цена ее была по возможности низкой. Эти требования, как правило, противоречивы, и компромиссное решение сводится к принятию большей разности, чем это допускается чисто эстетическими соображениями, причем ее величина будет в значительной мере зависеть от условий определения цветовых различий.

Методы сравнения

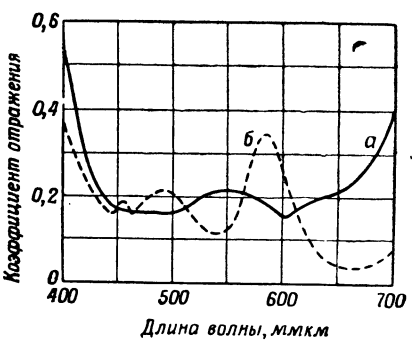
Вообще говоря, существуют пять методов определения цветовых различий: фотометрический, сравнительный, последовательный, временной и по памяти. Для каждого из них может быть оценена вероятная точность и определен возможный допуск на отклонение. Первый метод сравнения использует предельные психофизические возможности глаза, а последний сводится к чисто психологическому сопоставлению по памяти; остальные методы занимают промежуточное положение. Разница между предельными случаями составляет по величине несколько порядков, однако каждый метод сравнения основан на определенных принципах, связанных больше с психологическими особенностями восприятия, чем с деталями конкретного метода. Так, например, если производится цветовое сравнение образцов, обладающих аналогичными характеристиками спектрального отражения, то точность оценки определяется исключительно используемым методом. Если образцы явно различаются по спектру отражения, то будут играть важную роль условия наблюдения.

Термин «допустимое различие» в крайних случаях, следовательно, может обозначать скорее *меньшее* абсолютное цветовое различие, чем «едва воспринимаемое», так как допустимое различие не должно казаться большим при *любых* условиях освещения, в то время как суждение о «едва воспринимаемом» различии проводится при одном определенном освещении. Допустим, что две поверхности дают пороговое различие по цвету при наилучших фотометрических условиях наблюдения, причем их спектрофотометрические кривые изображаются, как показано на фиг. 14.1. Очевидно, что если распределение энергии освещающего источника излучения заметно изменится, то воспринимаемое цветовое различие может значительно возрасти. Если почему-либо необходимо пользоваться именно этими условиями освещения, то потребуется подобрать два образца с более близкими спектральными свойствами, чем первоначально выбранные.

В некоторых крайних случаях (например, для пары образцов, показанных на фиг. 14.2) может иметь место полное совпадение цветов при одних условиях (в данном случае выбраны наблюдатель и источник *C*, стандартные для системы МКО) и очень значительные различия в цветах при другом освещении. При освещении оранжевым светом, излучение которого лежит в области спектра 560—700 *ммкм*, поверхность, спектральные характеристики которой



Ф и г. 14.1. Кривые спектрального коэффициента отражения для двух поверхностей, совпадающих по цвету при освещении источником с цветовой температурой излучения около 4000° К.



Ф и г. 14.2. Кривые спектрального коэффициента отражения для двух объектов, цвет которых совпадает при освещении стандартным колориметрическим источником *C*.

изображаются кривой *а*, будет казаться красной, а поверхность, изображаемая кривой *б*,— желтой.

Цветовые различия не сильно зависят от способа наблюдения, если фактура сравниваемых образцов идентична. Однако они могут изменяться при изменении цветовой адаптации глаза наблюдателя. Например, две желтые поверхности могут казаться совершенно неразличимыми по цвету при искусственном освещении, но заметно различными для глаза, адаптированного к дневному свету. Опыт показывает, что глаз максимально чувствителен к цветовым различиям при освещении источником, близким к дневному свету, спектр которого слегка смещен в сторону голубого; профессиональные колористы работают при освещении излучением северного неба.

Психологическая сущность проблемы

После анализа факторов, определяющих цветовые различия, мы можем непосредственно перейти к рассмотрению взаимосвязи между цветовым тоном, насыщенностью и светлотой. При этом

следует иметь в виду, что *после* того, как различия были определены как допустимые, *спецификация* этих различий *должна* даваться либо с чисто физических, либо с психофизических позиций, так как не существует общепринятых обозначений для психологического цветового пространства.

Вопрос об относительном влиянии цветового тона, насыщенности и светлоты на восприятие цветовых различий весьма дискуссионный, несмотря на многочисленные попытки дать формулы, описывающие наблюдаемые факты. Определение и спецификация допустимых отклонений по цвету в производстве являются большой и все увеличивающейся по значению частью практической колориметрии. Необходимо ограничить наше рассмотрение лишь некоторыми надежно установленными основами подобных работ. Рассмотрим сначала концепции, связанные с самими допустимыми отклонениями, а затем на конкретном примере рассмотрим методы их определения.

Если считать, что цвет однозначно определяется цветовым тоном, насыщенностью и светлотой, то совокупность цветов образует трехмерное цветовое пространство. В пределах этого пространства все реально воспринимаемые цвета занимают определенное положение, зависящее от этих трех переменных. Если представить себе цветовое пространство, заполненное точками, изображающими возможные цвета, то точка, соответствующая заданному цвету, будет полностью окружена другими точками, соприкасающимися с ней во всех направлениях. Шесть из этих прилегающих точек изображают простые вариации в том смысле, что они указывают изменения только одной из трех переменных координат. Все другие точки соответствуют одновременным изменениям двух или всех трех переменных. Вообще точки, непосредственно прилегающие к данной, соответствуют слишком малым цветовым различиям, чтобы они были различимы. Однако точки, которые изображают заметные различия, также будут расположены на небольшом расстоянии от данной. Ближайшими точками, удовлетворяющими этому условию, будут те, которые представляют едва различимые разности по отношению к заданной точке. Все эти точки, взятые вместе, образуют замкнутую поверхность вокруг заданной точки. Форма этой поверхности будет зависеть от первоначально выбранного масштаба для трех основных переменных. Если, например, масштаб по оси насыщенности требует перемещения на 1 *мм* в направлении увеличения или уменьшения насыщенности для получения едва различимого изменения насыщенности, а по другим осям необходимо перемещение на 10 *мм* для получения едва заметного изменения цветового тона и перемещения на 5 *мм* для получения едва различимого изменения яркости, то очевидно, что искомая поверхность будет иметь плоскую эллиптическую форму толщиной 1 *мм*, шириной 5 и длиной 10 *мм*.

При других масштабах мы будем иметь другую форму пороговой поверхности, все точки которой изображают пороговые отклонения от цвета, представленного точкой в центре.

Однородное (равноконтрастное) цветовое пространство

Особый теоретический и практический интерес имеет такой способ построения цветового пространства, при котором пороговые поверхности будут представляться сферами одинакового радиуса для любой точки цветового пространства. Подобное цветовое пространство будет обладать одним весьма ценным свойством: все цвета будут находиться в постоянном и идентичном соотношении со своими непосредственными «соседями». На первый взгляд такое расположение цветов кажется не только логически возможным и естественным, оно как будто диктуется здравым смыслом. Однако имеются многочисленные основания полагать, что подобное построение возможно только в теории, а практическая реализация его может быть осуществлена лишь при таких ограниченных условиях, которые делают ее малополезной. Прежде всего, едва воспринимаемые различия в одной части цветового тела могут иметь иное значение в другой. Почти наверняка четыре значения едва воспринимаемых различий в светлоте представляют совсем другие *типы* различий, чем четыре значения различий цветового тона, и т. д. Другими словами, хотя подобное построение кажется логически очень хорошо обоснованным, однако оно не обязательно ведет к разработке полезной концепции.

Идеальной была бы такая система расположения цветов, при которой одинаковые цветовые различия изображались бы одинаковыми отрезками во всех областях цветового тела. Однако накопленные в настоящее время данные свидетельствуют о том, что подобная система в общем виде не может быть реализована. В частном случае, например для художественных красок или цветной бумаги с матовой поверхностью и т. п., подобную систему, вероятно, практически можно построить. Во всяком случае, она может служить базой для обсуждения проблемы цветовых различий и подразумевается почти при всех рассмотрениях этой проблемы.

Изложенное выше обсуждение было основано на пороговых различиях потому, что в этом случае *непосредственно измеряемые переменные* легко определяются визуально. Однако поверхности, окружающие точку, могут быть получены путем определения цветов вокруг заданной точки, которые при непосредственном наблюдении воспринимаются как имеющие одинаковые цветовые различия с данными. Если затем это пространство трансформировать так, чтобы все эти поверхности превратились в сферы равного

радиуса, то мы получим равноконтрастное распределение цветов в пространстве. Это размещение цветов будет строго справедливым только для выбранного метода сравнения, однако для него такая система будет значительно лучше, чем построенная на пороговых различиях. Подобная система также часто используется при определении допусков и решении ряда других аналогичных вопросов. Подобно другим системам, эта система не может быть точно воспроизведена физически, однако по крайней мере она дает теоретическую основу для дискуссии.

На практике различные небольшие области цветового пространства рассматриваются раздельно в непосредственной связи с конкретными практическими задачами и почти не предпринимается попыток использовать их для решения общей проблемы.

Разумеется, существует множество других возможных распределений, обладающих свойством давать одинаковые различия во всех направлениях. Однако следует иметь в виду, что хотя подобные пространства обладают полезными свойствами, тем не менее то или иное расположение цветов в них представляет собой удобное вспомогательное средство для нашего мышления и *ничего* более. Разность между двумя яркостями никогда не может выглядеть так же, как разность между красным и зеленым или между бледно-зеленым и насыщенным зеленым. Цветовые различия могут сравниваться лишь на базе вызываемых ими реакций глаза наблюдателя, который «замечает», «различает», «воспринимает», «не воспринимает» и т. п. Если они выглядят одинаково, то их можно сравнивать между собой непосредственно и все проблемы отпадают.

Спецификации цветовых допусков

Таким образом, цветовые различия даже для ограниченной области цветов должны определяться эмпирически на основе некоторых эстетических или любых других произвольных принципов. После их определения можно с помощью стандартных психофизических методов получить спецификации с любой степенью точности. Обычно подобные спецификации оформляются в виде допустимых пределов отклонений и ограничиваются случаями «приемлемых» отклонений от данного стандарта.

Допустимые отклонения могут быть специфицированы как путем выбора стандартных наборов материалов, иллюстрирующих допустимые отклонения, так и в той или иной колориметрической системе. В этом отношении спецификация допустимых отклонений по системе Манселла так же *правильна*, как и по системе МКО или любой другой. Их смысл одинаков, и различия только в удобстве применения. Единственным обязательным условием является создание путем использования *стандартной* и воспроизводимой коло-

Флуоресцирующие вещества

На всех рисунках изображен один и тот же флакон с флуоресцирующим красителем. Краситель желтый, его флуоресценция зеленая в том случае, когда падающий свет содержит синие лучи.

Слева на верхнем и нижнем рисунках объект освещается спереди одним и тем же светом, однако на светлом фоне (верхний рисунок) цвет красителя желтый, а на темном фоне (нижний рисунок) виден лишь свет флуоресценции.

На средних рисунках представлен случай, когда применялся желтый светофильтр: верхний рисунок соответствует установке светофильтра перед источником — флуоресценция отсутствует; нижний — установке светофильтра перед глазом — флуоресценция возникает.

Правые рисунки получены при использовании синего светофильтра, причем светофильтр также был расположен перед источником и перед глазом. В первом случае (верхний рисунок) флуоресценция возникает, так как объект освещается синим светом, во втором случае флуоресценция возникает уже от белого света, но не видна, так как синий светофильтр не пропускает зеленые лучи.

риметрической системы возможности определения того, попадает ли тот или иной цвет в заданные пределы. Трудно ожидать, что допустимые отклонения, установленные для производства черепицы, будут применимы для определения цвета фарфора, или искусственных зубов, или лака для ногтей; однако ко всем этим материалам применимы одни и те же принципы и методы определения допусков.

Допустимые отклонения обычно выражаются в единицах, удобных для используемой системы, и, как правило, они заметно различаются для разных цветов. Так, например, спецификация по системе Манселла требует, чтобы для цвета, совпадающего с зеленым при *G* 6/2 (цветовой тон зеленый, светлота 6, цветность2), различия не должны превышать $\pm$ 2 единиц цветности, $\pm$ 0,5 единицы светлоты и $\pm$ 0,5 единицы цветового тона. В системе МКО эта спецификация будет выглядеть так: доминирующая длина волны не должна изменяться более чем на $\pm$ 20 *ммкм*, чистота — более чем на $\pm$ 5% и коэффициент отражения — более чем на $\pm$ 5%. Возможно также дать действительные величины предельных значений, например, для доминирующей длины волны — от 590 до 610 *ммкм*, для чистоты — от 50 до 55%, для коэффициента отражения — от 0,40 до 0,45.

Определение цветовых допусков

После того как мы познакомились со значением цветовых различий и связанных с ними допустимых отклонений, а также способом их выражения, мы можем перейти к способам определения допустимых отклонений и различий для практических целей.

Совершенно очевидно, что допустимые отклонения должны определяться непосредственным наблюдением предпочтительно большим числом наблюдателей. Очевидно также, что при этом важную роль будут играть такие обстоятельства, как метод предъявления образцов, условия их рассматривания, инструктаж наблюдателей и качество источника освещения. Если же допустимые отклонения должны определить пределы для приемки продукции, то может сказаться влияние добавочных экономических факторов, которые увеличат допустимые отклонения.

Методы сопоставления образцов уже вкратце рассматривались ранее. Вообще говоря, едва заметное различие будет зависеть от таких факторов, как размеры образцов, способ сравнения образцов, интенсивность освещения и геометрия светового пучка. Совершенно необходимо (особенно в тех случаях, когда результаты будут применяться к готовому продукту), чтобы эти факторы были сопоставимы с теми, которые встретятся на практике.

Рассмотрим несколько конкретных примеров. Предположим, что требуется выдерживать постоянство цветовых характеристик последовательных партий некоторого прозрачного материала (например, стекла или пластмассы) с весьма жесткими допусками. Требуемый цвет определяется по выбранному эталонному образцу продукции. Можно создать прибор, в котором этот эталон и другие образцы, слегка отличающиеся от него, будут являться двумя половинами фотометрического поля при умеренно высоком уровне освещенности. При этих условиях обеспечивается максимальная чувствительность к цветовым различиям и может быть подобран ряд переменных, который будет представлять едва воспринимаемые различия. В этом случае допустимые отклонения будут чрезвычайно малыми и образцы, соответствующие максимально допустимым различиям, будут восприниматься при обычных условиях как совершенно неразличимые.

В тех случаях, когда допустимые отклонения велики, наблюдатель может производить определение цвета, помещая сравниваемые образцы рядом на белом фоне. В этом случае едва заметные цветовые различия будут гораздо большими, чем в предыдущем случае, и соответственно необходимо увеличить установленные пределы допустимых отклонений. Если метод по способу сравнения ближе к тем условиям, при которых изделия рассматриваются в реальных условиях, то получаются величины допустимых отклонений, более приемлемые. Еще большие различия будут восприниматься как допустимые, если использовать метод последовательного наблюдения, т. е. когда наблюдатель видит только один образец и должен отобрать те образцы, которые кажутся ему одинаковыми. В этом случае допустимые отклонения будут настолько значительными, что, если изделия поместить рядом друг с другом, цветовые различия окажутся весьма заметными. Таким образом, *способ* непосредственного сравнения определяет *величину* наблюдаемых цветовых различий.

Геометрия освещения, при котором рассматриваются образцы, также оказывает заметное влияние на наблюдаемые цвета и на выбор допустимых отклонений. Предположим, что изделия изготовлены из материала с глянцевой поверхностью и слабо выраженной фактурой. Возьмем крайний случай, когда образцы сравниваются в комнате с рассеянным освещением, созданным светом, отраженным от белого потолка и белых стен. При этих условиях насыщенность цвета образцов вследствие отражения от белых поверхностей может быть настолько низкой, что довольно значительные действительные различия в цвете образцов совершенно не будут обнаруживаться. С другой стороны, если рассматривать образцы попарно в темной комнате при ярком освещении, направленном таким образом, что прямые отражения не будут попадать в глаз, то могут обнаружить-

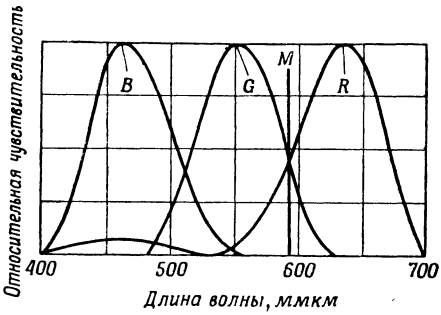
ся такие различия, которые сопоставимы с различиями, замечаемыми при методе разделенного фотометрического поля.

Помимо геометрии и интенсивности освещения, необходимо учитывать спектральный состав света. Как было показано в предыдущих главах, два источника света могут обладать визуально одинаковым цветом при сильно различающихся распределениях энергии. Если для определения допустимых отклонений используется источник, сильно отличающийся от того, при свете которого будет рассматриваться изделие, то полученные данные не могут непосредственно применяться на практике. Подобная трудность иногда возникает при использовании искусственных источников, предназначенных для имитации дневного света. Если искусственные источники обладают распределением энергии по спектру, отличающимся от распределения энергии дневного света, то при использовании этих источников цветовые различия некоторых цветов будут более заметными, чем при дневном освещении, а при использовании других источников — менее заметными. Нередко бывает, что цвета, полностью совпадающие при искусственном освещении, могут иметь большие цветовые различия при дневном освещении, и наоборот. Чтобы цветовые различия любых цветных образцов казались одинаковыми при освещении двумя различными источниками, *необходимо*, чтобы у этих источников совпадали не только цветности, но и относительное распределение энергии по спектру. Практически небольшие различия в цвете освещающих источников света имеют гораздо меньшее значение, чем разница в спектральном распределении энергии.

С вопросом влияния распределения энергии источника на цвет предметов тесно связана проблема цветовых различий, возникающих при использовании нескольких источников света. При этом следует учитывать не только изменение спектрального состава излучения, отраженного от сравниваемых образцов, но и явление цветовой адаптации. Ранее уже указывалось, что человеческий глаз стремится адаптироваться к цвету основного освещающего источника таким образом, чтобы цвета объектов хотя бы частично приближались к таким, какими они выглядят при дневном освещении. Были обнаружены два довольно существенных исключения из этого явления «постоянства цвета». Для монохроматического света или для цветов, распределение энергии которых приближается по характеру к монохроматическому свету, постоянства цвета не наблюдается. Помимо того, относительные яркости различных участков спектра не изменяются при цветовой адаптации.

Если необходимо, чтобы некоторый материал казался синим при дневном свете, то весьма нежелательно, чтобы при искусственном освещении он казался пурпурным, особенно если цвет является своего рода товарной характеристикой продукта. Однако

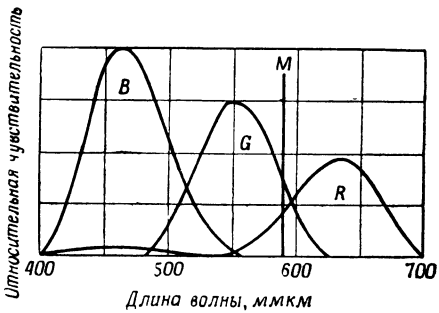
изменение спектрального распределения энергии освещающего источника может вызвать этот эффект, и допустимые пределы этого явления должны быть положены в основу стандартов на его цвет. Второй из упоминавшихся эффектов (сохранение относительных яркостей) определит разницу в восприятии синего и красного цветов: синий будет казаться более темным, чем красный при искусственном освещении, по сравнению с дневным светом. Однако этот эффект имеет общий характер и настолько мало зависит от спектральной отражательной способности, что на него трудно воздействовать. К счастью, благодаря общему характеру этого эффекта он привычен и обычно люди его не замечают.



Ф и г. 14.3. Схематические кривые спектральной чувствительности рецепторов глаза, иллюстрирующие случай, когда монохроматическое излучение стимулирует в равной степени красные и зеленые рецепторы, давая ощущение желтого цвета.

Когда глаз адаптируется к цветному освещению, то, очевидно, происходит изменение цветовой чувствительности трех цветоощущающих приемников глаза. Чувствительность каждого из этих приемников распространяется примерно на $^1/_3$ спектра. Процесс адаптации вызывает изменение абсолютных чувствительностей отдельных приемников, в результате которого цвет *освещающего света* воспринимается как белый или почти белый. Следовательно, если спектральный состав данного цвета ограничивается только узкой областью спектра или имеет резкие пики при некоторых длинах волн, то отношение реакций приемников до и после адаптации будет различным. Это явление лучше всего наблюдается при монохроматических излучениях, но до некоторой степени может иметь место и для всех излучений с резкими изменениями спектра. На фиг. 14.3 приведены кривые R, G и B относительной спектральной чувствительности трех приемников глаза в условиях дневного освещения; линия M изображает монохроматический свет, попадающий в глаз. Если глаз адаптирован к свету лампы накаливания, который имеет относительно оранжеватый оттенок, то произойдет изменение абсолютных чувствительностей приемников, в результате чего относительные чувствительности изменяются так, как показано на фиг. 14.4 То же монохроматическое излучение M будет оказывать иное относительное воздействие на приемники, чем в условиях дневного освещения.

Для того чтобы по возможности исключить сдвиги цветового тона, вызываемые этим эффектом, очевидно, необходимо избегать применения красителей с резко изменяющимися спектральными характеристиками отражения. В общем случае сдвиги будут тем меньше, чем шире кривая абсорбции и чем меньше на ней крутых участков. Если два различных красителя обладают крутыми кривыми, то, будучи одинаковыми при дневном освещении, они могут заметно различаться при искусственном; например, если они синие, то при искусственном освещении один может остаться синим, а другой — казаться пурпурным.



Ф и г. 14.4. Кривые спектральной чувствительности приемников глаза после адаптации к свету оранжевого источника.

Чувствительность красных приемников понизилась по отношению к чувствительности зеленых, и теперь излучение монохроматического источника будет восприниматься как имеющее зеленоватый цвет.

Определение допустимых пределов изменения цветности и, следовательно, выбор красителей должны, очевидно, основываться на средних оценках ряда наблюдателей, последовательно рассматривающих образцы при свете различных источников. К сожалению, широкое распространение люминесцентных ламп с распределением энергии излучения, заметно отличающимся как от дневного света, так и от света ламп накаливания, превращает «нестабильность» красителей при различном освещении в серьезную проблему [1]. Так, дубовый стол, имеющий красивый цвет как при дневном свете, так и при свете ламп накаливания, перестает быть привлекательным, когда при свете люминесцентных ламп он кажется зеленым.

Также очевидно, что изготовители источников света встречаются с аналогичными проблемами при установлении допустимых отклонений, вызываемых различными источниками света для цвета обычных окрашенных объектов по сравнению с более нормальными условиями освещения тех же цветов. Предметы искусства, мясо, яйца, различные сорта древесины воспринимаются одинаковыми по цвету при дневном свете и освещении лампами накаливания, однако их цвет заметно изменяется при освещении источниками, энергия излучения которых сосредоточена в синем и оранжевом участках спектра. Широкое распространение подобных источни-

[1] В последнее время в Советском Союзе разработаны и выпускаются люминесцентные лампы с улучшенным качеством цветопередачи типа ЛЦДС, для которых описываемые автором недостатки значительно уменьшены.— *Прим. ред.*

ков оправдывается лишь их экономичностью и уменьшенным тепловым излучением.

Цветовые различия и допустимые отклонения цветов, определяемые с помощью этих источников, следовательно, зависят от многочисленных обстоятельств, особых для каждого конкретного случая.

Как следует из изложенного выше, они могут быть определены и установлены только для конкретных условий наблюдения, близко совпадающих с условиями их практического использования. Будучи установлены, они могут быть специфицированы с любой степенью точности с использованием известных и легко воспроизводимых психофизических методов. Специфицированные величины допусков определяются не только цветоразличительными свойствами глаза, но и рядом обстоятельств, не связанных непосредственно с цветным зрением (производственными возможностями, стоимостью и пр.).

Название цветов

С проблемами цветовых различий тесно связаны вопросы названий цветов. Как и во многих других областях, важнейшие различия между цветами имеют специальные названия. Однако только *важнейшие* различия отмечаются достаточно четко, чтобы образовать такой критерий различий, который может быть назван «именованными различиями» между цветами. Существуют два близких друг к другу способа описания цветов. По одной терминологии цвета описываются на абсолютной основе, т. е. по отношению к цветовым ощущениям. По другой терминологии описываются разности между двумя цветами, т. е. направление и величина изменений цветового тона, насыщенности и светлоты. По Джадду, существует около 10 млн. цветовых различий, которые могут быть описаны словами, указывающими направление изменения их цвета, однако, разумеется, не существует такого количества названий цветов. Цветовой словарь Мэрца и Пауля [52], созданный на основании исчерпывающих исследований, содержит менее 4000 названий. Около 36 из них выражены отдельными словами, имеющими непосредственный цветовой смысл; около 300 представляют собой сложные слова, состоящие из названий цветов и соответствующего прилагательного; около 90 являются наименованиями обычных окрашенных объектов. Таким образом, общее количество цветов, которые можно считать явно различными, не очень велико, и в настоящее время разработана практическая система для систематического наименования цветов окрашенных поверхностей, которая имеет только 319 подразделений.

Обычно используемое количество цветовых терминов гораздо меньше. Паулина Ивенс недавно провела исследование на материале 17 работ современных авторов.

Результаты этих исследований приведены в табл. 14.1. Интересно отметить, что из 12 терминов только 2 (золотистый и серебристый) связаны с названиями предметов или веществ, остальные являются непосредственно цветовыми терминами, охватывающими 87% общего числа рассмотренных терминов.

Таблица 14.1

Цветовые термины, использованные в 17 современных работах авторов [1])

Цвет	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	Всего	В процентах к общему
Белый	933	Нет	10	14	Нет		957	21,7
Черный	689	»	1	3	1		694	15,7
Синий	390	44	21	2	25		482	10,7
Красный	448	9	8	8	4		477	10,7
Серый	368	11	12	7	2		400	9,1
Зеленый	243	34	14	22	6		319	7,2
Коричневый	157	11	3	8	6		185	4,2
Золотистый	176	1	Нет	3	Нет		180	4,1
Желтый	147	8	5	3	1		164	3,7
Розовый	111	2	Нет	Нет	2		115	2,6
Серебристый	60	Нет	»	1	Нет		61	1,4
Пурпурный	44	1	»	1	1		47	1,1
Прочие цвета	300	10	3	1	3	18	335	7,6
Всего	4066	131	77	73	51	18	4416	

[1]) В вертикальных колонках указывается, сколько раз использовался тот или иной термин. В колонке *A* — единичные термины (например, черный, чернее, самый синий); в колонке *B* — термин с добавлением слов, поясняющих насыщенность, светлоту и т. п. (например, темно-синий, ярко-красный, бледно-зеленый); в колонке *C* — с поясняющими словами, образованными от названий объектов или веществ (например, ледяно-голубой, молочно-белый, вишнево-красный); в колонке *D* — с поясняющими терминами, образованными от названий других цветов (например, розовато-белый, голубовато-зеленый); в колонке *E* — со словами, поясняющими характер цвета (густо-синий, тускло-красный, интенсивно-зеленый); в колонке *F* — множественные цветные термины (например, черный и белый, красный и синий).

Тридцать три цветовых термина в системе Мэрца — Пауля представляют собой чисто цветовые термины, не зависящие от предметов или веществ. Эти термины приведены в табл. 14. 2, где указана также повторяемость этих терминов в 17 исследованных литературных произведениях. Восемь из этих терминов не употреблялись совершенно и четыре употреблялись только по одному разу. Важно отметить то, что 90% общего числа использованных цветовых терминов входят в число тех, которые приведены в табл 14.2.

Таблица 14.2

Частота повторения чисто цветовых терминов по Мэрцу — Паулю в литературе, подвергнутой исследованию

Цвет	Частота повторения	Цвет	Частота повторения
Золотисто-каштановый	3	Пурпурно-красный	6
Лазурный	0	Каштановый	4
Черный	694	Розовато-лиловый	9
Белокурый	16	Оранжевый	25
Синий	482	Розовый	115
Коричневый	185	Пурпурный	47
Вороньего крыла	0	Красный	477
Буйволовой кожи	1	Кирпичный	1
Голубой	0	Багряно-красный (алый)	12
Вишневый	1	Сепия	0
Малиновый	24	Рыжевато-коричневый	9
Серовато-коричневый	0	Таупе	0
Неотбеленного полотна	0	Белый	957
Серый	400	Желтый	164
Зеленый	319	Фиолетовый	23
Телесный	0	Хаки	1
Индиго	2		

Психологические основные цвета

Если внимательно рассматривать спектр достаточно высокой интенсивности, то можно обнаружить, что из всей гаммы цветов выделяются только четыре цветовых тона, четко отличающихся друг от друга. Это — красный, желтый, зеленый и синий. Все другие цвета можно рассматривать как содержащие два или более из этих цветовых тонов. Таким образом, существуют четыре основных спектральных цветовых тона, которые иногда называются «психологическими основными цветами». Можно представить себе, по крайней мере теоретически, что все цвета могут быть описаны с помощью только этих цветов, сгруппированных попарно, с использованием тех или иных прилагательных. Однако существуют достаточно четко различимые промежуточные цвета, получившие особые названия, и если записать по порядку вышеуказанные четыре цвета вместе с промежуточными, то получится следующий ряд: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый, пурпурный.

Здесь следует обратить внимание на одно обстоятельство, которое люди, непосредственно не связанные с применением цветовых понятий в различных областях, редко замечают. Оно заключается в том, что одинаковые цветовые *термины*, используемые разными группами людей, нередко относятся к совершенно различным *цветам*. В вышеприведенном списке, например, термины *голубой* для цвета между *синим* и *зеленым* и *пурпурный* для цвета между *красным* и *синим* заимствованы из терминологии субтрактивной цветной фотографии, в то время как термин *красный* используется физиками для обозначения длинноволнового конца спектра. Художник будет называть *голубым* гораздо более синий цвет, а *красным* — названный в нашем списке пурпурно-красный и т. д. В нашем случае термин *фиолетовый* используется для описания восприятия коротковолнового конца спектра, когда свет возбуждает как синие, так и красные приемники. Тот же самый цвет может быть получен при смешении более длинноволнового синего света с небольшим количеством красного, его обычно называют *пурпурным*. Нет общепринятых терминов для обозначения цвета, промежуточного между зеленым и желтым; эти цвета непрерывно переходят один в другой без отчетливого промежуточного цветового тона. Также маловероятно, чтобы был выработан специальный термин для цвета, промежуточного между синим и зеленым, использующегося в субтрактивных цветовых смесях как основной цвет, не передающий красного. Художникам он известен обычно как *сине-голубой*, а предыдущий — как *желто-зеленый*. Хотя существует немного названий спектральных цветовых тонов и они весьма просты, практика применения к ним различных наименований различными группами людей свидетельствует о необходимости использовать для анализа цветовых различий гораздо большее количество названий цветов.

До сих пор мы ограничивались рассмотрением чистого спектра и смесей красного и синего света. При переходе ко всему диапазону цветов реальных поверхностей необходимо значительно расширить цветовую терминологию. Для характеристики спектра, спроецированного в темной комнате, мы пользовались в основном понятиями цветовых тонов, пренебрегая влиянием изменения насыщенности и светлоты. Для цветов поверхностей эти переменные приобретают важное значение и их необходимо учитывать.

Рассмотрим сначала цвета, получающиеся при смешивании чистых пигментов (красителей) с белыми. Пурпурные краски, смешанные с белым, дают лавандовые и орхидейные цвета и т. п., в то время как пурпурно-красная краска, смешанная с белой, дает розовый цвет. Большая часть остальных разбавленных цветов описывается как *бледные*, например *бледно-зеленый*, *бледно-синий* и т. п., либо описывается цветами тех объектов, которые они напоминают

(*морская зелень* или *пастельно-синий*), несмотря на то, что каждый из них может быть достаточно насыщенным.

При смешении чистых пигментных цветов с черным образуется несколько совершенно новых цветов. Например, смесь желтого с черным дает *оливково-зеленые*, а комбинации желто-оранжевого, оранжевого и красного с черным дают различные *коричневые* тона.

Если цветовые смеси, содержащие черный, смешиваются в свою очередь с белым, получаются новые серии цветов, включающие такие оттенки, как рыжевато-коричневый, начиная с коричневого, и хаки, начиная с желтоватых цветов.

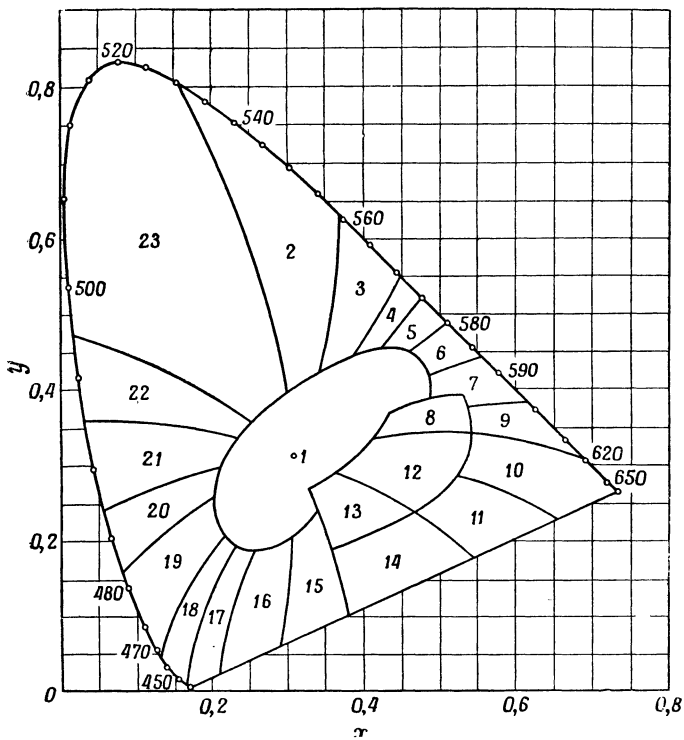
Следовательно, путем смешения цветных красок с черными и белыми могут быть получены несколько новых цветов, которые отсутствуют в спектре и которые имеют достаточно большое значение и заслуживают отдельного названия. Однако общее количество подобных терминов довольно невелико и в обычной речи значительная часть гаммы возможных цветов обозначается с помощью дополнительных прилагательных, например «бледный серо-зеленый», «чистый ярко-красный» или «умеренно красновато-оранжевый».

Название цветов ISCC — NBS

В 1939 г. была сделана попытка стандартизировать методы обозначения цветов таким образом, чтобы они не требовали использования эталонных образцов и в то же время были достаточно определенными, чтобы на их основе можно было разработать четкие спецификации. Подобные попытки предпринимались еще в 1931 г., когда Фармакологический комитет США потребовал от недавно созданного Межведомственного комитета по цвету (ISCC) рассмотрения названий цветов лекарств с целью создания общепризнанной системы. В результате появилась работа Джадда и Келли [35]. В основном эта система складывается из названия одного из следующих цветовых тонов: *красный*, *желтый*, *зеленый*, *синий*, *пурпурный*, *оливковый*, *коричневый* и *розовый* — и дополнительных терминов: *слабый*, *сильный*, *светлый*, *темный* — и слова *очень*. Для удобства используются также комбинированные термины: *бледный*, *блестящий*, *глубокий* (сильно темный), *сумеречный* (слабо темный) и *живой* (очень сильный). Этим устраняется необходимость применения таких терминов, как *очень слабо-светлый*. Промежуточные названия цветовых тонов образуются такими комбинациями, как красновато-пурпурный и т. п. В результате подобная система охватывает 319 обозначений для всех возможных цветов отражающих свет материалов.

В статье, описывающей систему ISCC—NBS, используются обозначения Манселла для всей серии названий цветов. В связи с тем что теперь известна связь системы Манселла с системой МКО,

названия цветов по ISCC—NBS могут быть выражены в координатах этой системы. Это позволяет построить логическую систему наименований цветов, которая может быть приспособлена для раз-



Ф и г. 14.5. Местоположение различных областей цветности на цветовом графике.

Названия цветов для излучений, попадающих в эти области, предложены Келли [38]. *1* — белый (стандартный колориметрический источник *C*); *2* — желтовато-зеленый; *3* — желто-зеленый; *4* — зеленовато-желтый; *5* — желтый; *6* — желтовато-оранжевый; *7* — оранжевый; *8* — оранжево-розовый; *9* — красновато-оранжевый; *10* — красный; *11* — пурпурно-красный; *12* — розовый; *13* — пурпурно-розовый; *14* — красно-пурпурный; *15* — красновато-пурпурный; *16* — пурпурный; *17* — синевато-пурпурный; *18* — пурпурно-синий; *19* — синий; *20* — зеленовато-синий; *21* — сине-зеленый; *22* — синевато-зеленый; *23* — зеленый.

личных практических применений. Разумеется, как и все подобные системы, она имеет ограничения, относящиеся к промежуточным цветам, которые лежат, так сказать, между двумя возможными обозначениями.

Если сделать попытку применить эти названия к цветам прозрачных веществ, то многие из них, разумеется, должны быть изменены, так как для более светлых цветных поверхностей в случае нулевой насыщенности и максимальной светлоты это будет *белый*, тогда как для окрашенных растворов это — *чистые* и *бесцветные*. Подобная же система с некоторыми изменениями может быть использована для названий цвета излучения источников света. В последнем случае мы не встречаемся с излучением малой яркости и поэтому ряд названий (например, *коричневый*) должен быть из терминологии исключен.

На фиг. 14.5 показана подобная система для источников света, разработанная Келли, применительно к колориметрической системе МКО.

ГЛАВА XV

Смешение окрашенных световых потоков

В предыдущих главах рассматривалось изображение цветов и цветовых смесей на цветовом графике. В настоящей главе описывается применение таких графиков для определения результатов аддитивного смешения цветов. В двух последующих главах будет описано применение цветовых графиков для субтрактивного смешения цветов. Все рассмотрение почти исключительно ограничивается системой МКО, однако использованные принципы имеют общий характер и справедливы для всех подобных колориметрических систем.

Цветовые графики для аддитивных смесей

Цветовой график служит для отсчета относительного содержания трех аддитивных основных цветов. Точка на таком графике указывает соотношение трех координат данного цвета. Хотя любая точка соответствует вполне определенному соотношению количеств основных цветов, однако существует бесконечное число других распределений энергии, которые дадут тот же цвет. Кроме того, может быть использовано бесконечное множество наборов основных цветов, причем выбор того или иного набора определяется соображениями удобства. (Положение о *бесконечном* множестве составляющих предполагает бесконечно малые разности между ними. Если составляющие должны быть различными, то их число становится конечным и не очень большим). Таким образом, точки на цветовом графике МКО или другой подобной диаграмме определяют бесконечное множество спектральных распределений энергии, соответствующих (для стандартного наблюдателя) той же цветности. При этом важное значение имеет то, что сравниваются цвета, а не окрашенные объекты. Следовательно, цветовые графики характеризуют исключительно *излучения*, оцениваемые стандартным наблюдателем. Точка цветового графика в системе МКО может быть легко выражена также в единицах колориметрической системы, построенной на комбинации монохроматических компонент и белого цвета. С помощью соответствующих графиков или диаграмм координаты этой системы могут быть преобразованы применительно к любой другой системе смешения цветов.

Однако в настоящее время не известны правила, по которым можно было бы рассчитать распределение энергии излучения, соответствующее заданной точке цветового графика, хотя такие правила были бы очень полезны. Подобное положение частично объясняется чрезвычайной свободой выбора. Для любого цвета не очень высокой чистоты можно подобрать такое распределение энергии, которое имеет любое заданное значение для одной выбранной длины волны, причем стандартный наблюдатель будет определять эти излучения как точно совпадающие по цвету.

Однако, используя цветовой график, можно сформулировать некоторые весьма полезные правила для предсказания результатов смешения окрашенных световых потоков. Если источник света с заданным распределением энергии излучения освещает неселективную поверхность и, отражаясь от нее, попадает в глаз, то при этом не происходит изменения в относительном спектральном распределении энергии. Если на поверхность проецируются одновременно два или более таких световых потоков, то они все действуют независимо и глаз воспринимает их сумму. Простые суммы такого типа могут быть изображены на любом из описанных ранее цветовых треугольниках. На основании геометрии цветовых графиков можно сказать, что смеси цветных световых потоков, соответствующих любым двум точкам цветового треугольника, изображаются на прямой линии, соединяющей эти точки. (Геометрическое обоснование этого положения выходит за рамки данной книги. Читателям, интересующимся математической стороной данной проблемы, следует обратиться к работе [75].)[1] Таким образом, точки M и N на фиг. 15.1 изображают определенные соотношения основных цветов — в данном случае гипотетических составляющих в системе МКО, которые будут соответствовать некоторому из бесконечного числа возможных распределений энергии. Если какие-либо из световых потоков с распределением энергии, изображаемым этими точками, аддитивно смешать, то цветность, полученная в результате этого смешения, может быть изображена точкой на прямой, соединяющей точки M и N. Кроме того (и это весьма важно для расчетов), точное положение точки на этой прямой может быть определено по отношению интенсивностей двух составляющих цветов. В этом случае «интенсивность» измеряется в особых величинах, представляющих собой частное от деления яркости на координату цветности y, являющуюся ординатой цветового графика. Если один из смешиваемых световых потоков имеет 2 специальные единицы, а второй — 1 единицу, то точка смеси будет лежать на $^2/_3$ расстояния от точки для меньшей интенсивности и на $^1/_3$ от точки для большей интенсивности. Другими словами, положение точки на прямой обратно

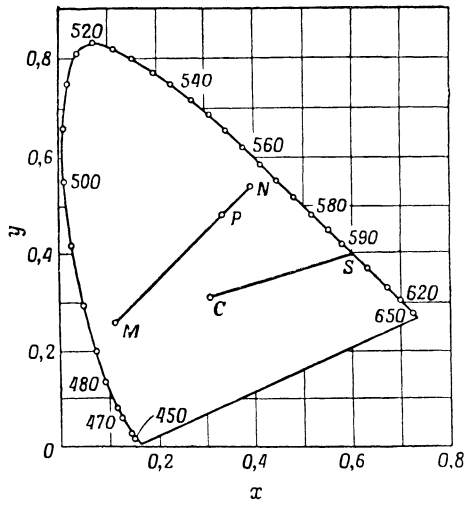
[1] См. также работу [4] в списке дополнительной литературы.— *Прим. ред.*

пропорционально относительной интенсивности двух световых потоков. Например, точка P на фиг. 15.1 изображает смесь, содержащую четыре части цвета N и одну часть цвета M и, следовательно, отрезок MP составляет $^4/_5$ отрезка MN. Это свойство цветового графика позволяет использовать его для расчета координат цветовых смесей. Один из подобных способов лежит в основе обычной системы описания цветов и уже был рассмотрен ранее. Если некоторая точка на цветовом графике соответствует белому свету (независимо от того, как он определяется), то прямая, соединяющая эту точку с точкой, изображающей чистый монохроматический свет любой длины волны, описывает все смеси белого света с данным монохроматическим излучением. В системе МКО эта прямая определяет все распределения энергии, обладающие заданной доминирующей длиной волны; другими словами, любой цвет может быть определен как совпадающий со смесью монохроматического излучения и излучения заданного источника белого света, причем соотношения того и другого определяются положением точки на указанной выше прямой. Относительное расстояние, которое расчетная точка занимает между точкой «белого» и точкой «спектрально чистого», в системе МКО определяется как «чистота»[1]. Этому случаю соответствует прямая CS на фиг. 15.1.

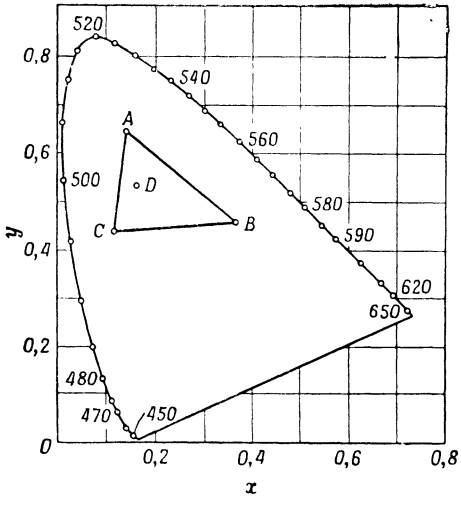
Другим ценным свойством подобных цветовых графиков, вытекающим из простых правил изображения смесей на прямой линии, является возможность предсказания результатов смешения любого количества цветных световых потоков. Рассмотрим случай смешения трех световых потоков, изображаемых точками A, B и C на фиг. 15.2. Попарные смеси изображаются прямыми линиями, соединяющими эти точки. Любую точку внутри треугольника (например, точку D) можно рассматривать как результат смешения двух из них с соответствующим количеством третьего. В случае, когда в смеси содержатся все три цвета в одинаковом количестве, она будет изображаться точкой в центре тяжести треугольника, т. е. точкой, в которой пересекаются его медианы.

В тех случаях, когда число источников больше трех, получаются более сложные фигуры. Так, на фиг. 15.3 точки A, B, C, D, E и F соответствуют цветности шести источников. Цветности, которые могут быть получены при смешении любых из этих составляющих, лежат внутри изображенного на фиг. 15.3 шестиугольника. Точка, представляющая смесь любого состава и количества излучения этих источников, может быть определена непосредственно путем последовательного построения: сначала находят точку, соответствующую сумме двух цветов, затем к ней прибавляют третий цвет и т. д.

[1] См. примечание к гл. XIII, стр. 285.— *Прим. ред.*

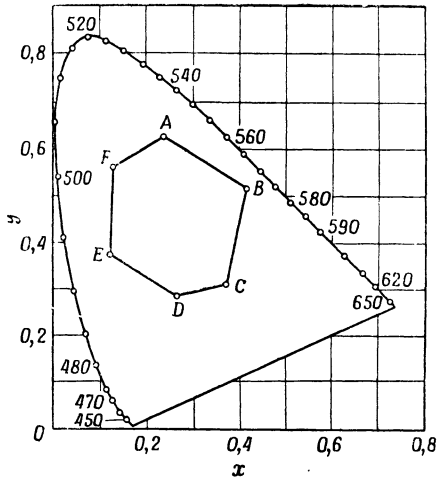


Ф и г. 15.1. Цветовой график, показывающий результат аддитивного смешения света двух источников, имеющих цветность, изображаемую точками M и N, при смешении в пропорции четырех частей N и одной части M.



Ф и г. 15.2. Область цветности, образованная тремя источниками света с цветностями A, B и C.

Изменяя соотношения яркостей этих источников, можно получить любую цветность смеси в пределах треугольника, вершинами которого служат точки A, B и C.



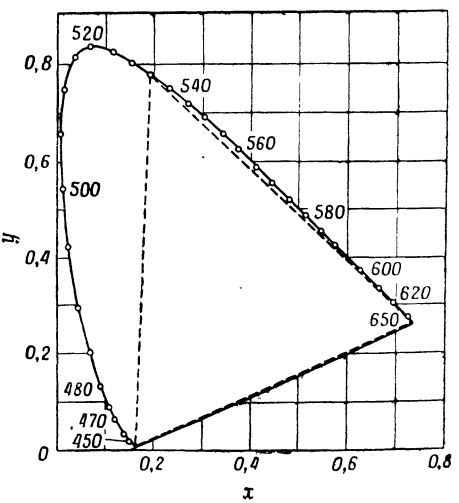
Ф и г. 15.3. Область цветности, полученная для шести основных цветов.

Все цветности внутри шестиугольника могут быть получены путем изменения относительной яркости различных смешиваемых цветов.

Таким образом, цветовой график позволяет рассчитать цветности аддитивных смесей цветных световых потоков и показывает, что результат такого сложения не зависит от распределения энергии, как такового, так как каждая точка графика соответствует бесконечному множеству различных спектральных составов излучения. Для аддитивных смесей результат смешения зависит только от цвета смешиваемых излучений. В следующей главе будет показано, что для субтрактивных смесей, т. е. смесей красителей, наоборот, цвет смеси определяется *исключительно* спектральными характеристиками и почти не зависит от цвета отдельных составляющих.

Цветовой охват

Возможность расчета аддитивных смесей с помощью цветового графика используется довольно широко. Например, можно выбрать такие цвета, которые, будучи примененными в качестве основных, дадут максимально широкую область охвата цветов объектов, встречающихся в природе. Такой выбор был сделан Харди и Вурцбургом [23]; результаты их работы показаны на фиг. 15.4. Эта область получена путем смешения трех монохроматических световых потоков с длинами волн 700, 535 и 400 *ммкм*. Реально осуществимая область цветов простирается в направлении, перпендикулярном к плоскости треугольника, образованного прямыми, соединяющими эти три точки, и включает в себя широкий диапазон яркостей.

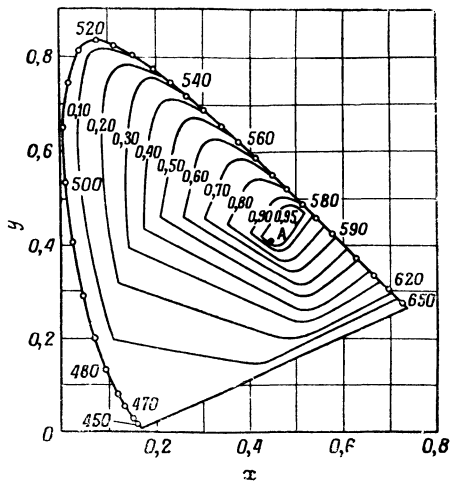


Фиг. 15.4. Аддитивный треугольник Харди и Вурцбурга, показывающий максимальный цветовой охват при использовании в качестве основных цветов трех монохроматических излучений.

Используя тот факт, что отражающие окрашенные поверхности не могут иметь коэффициент отражения более 100% для любой длины волны, можно подсчитать максимальную, теоретически возможную чистоту цвета для отражающих красителей при заданном значении коэффициентов отражения. Такие расчеты были проведены Мак-Адамом [46] и их результаты показаны на фиг. 15.5. Эти результаты

были критически рассмотрены Викерштаффом [78] применительно к зрительному восприятию некоторых реальных красителей.

Законы аддитивного смешения цветов могут служить основой для полной теории аддитивной трехцветной фотографии. Эта теория была сформулирована Мак-Адамом [48]. Сущность ее заключается в том, что если цвет разлагается на три компоненты фотографической системой, действующей подобно глазу, то эти три компоненты могут быть использованы для управления тремя цветными источниками света. В этом случае для объектов, цветности которых лежат внутри треугольника цветового охвата, возможно точное воспроизведение цвета. Все цвета, лежащие вне этой области, будут воспроизводиться точками на линиях, соединяющих соответствующие пары основных цветов. Требуемыми кривыми чувствительности для фотографического процесса будут кривые сложения цветов колориметрической системы, в качестве основных цветов которой выбраны цвета смешиваемых излучений. Более подробно этот вопрос будет обсуждаться в гл. XX.



Ф и г. 15.5. Кривые цветностей оптимальных поверхностей с различными коэффициентами отражения при освещении стандартным источником A.

На графике показаны максимально возможные коэффициенты отражения для различных цветностей, а также максимальная возможная чистота, которую может иметь поверхность при заданном коэффициенте отражения. Отсюда видно, что желтые поверхности могут обладать как высокой яркостью, так и большой чистотой, в то время как для сохранения высокой чистоты синих поверхностей они должны быть довольно темными (см. [46]).

Дополнительные цвета

Принцип аддитивности, согласно которому результаты цветового смешения изображаются прямыми линиями на цветовых треугольниках, позволяет легко предсказывать дополнительные цвета. Если линия, соединяющая две точки цветового графика, проходит через точку, изображающую белый цвет, то очевидно, что при соответствующем соотношении интенсивностей двух монохроматических составляющих образуется белый цвет (или серый в зависимости от условий наблюдения). Длины волн таких монохроматических составляющих называются дополнительными. Из рассмотрения кри-

вой спектральных цветов на цветовом графике видно, что только часть спектра на каждом конце является дополнительной по отношению к другим частям спектра; имеется участок в зеленой области спектра, где необходимо использовать смесь длинноволновых и коротковолновых составляющих, т. е. пурпурные цвета, для образования дополнительных цветов. Монохроматические излучения, являющиеся дополнительными друг к другу, были показаны на фиг. 7.13.

Следует иметь в виду, что смесь монохроматических световых потоков (за исключением небольшого участка в длинноволновой области спектра) всегда имеет меньшую чистоту, чем каждая из составляющих. Следовательно, в пропускающих или отражающих селективных поглотителях ширина спектральной области пропускания или отражения определяет чистоту образованного цвета. Чем шире эта «полоса», тем менее насыщенным получается цвет. Максимальная чистота или насыщенность цвета соответствует, конечно, монохроматическим излучениям.

Насыщенность цвета

Рассмотрим снова вопрос о соотношении между психофизическими переменными, изображаемыми на цветовом графике, и соответствующими цветовыми восприятиями. Хотя справедливо утверждение о том, что монохроматический свет имеет максимальную колориметрическую чистоту, которая может быть достигнута с помощью реальных источников света, это не означает, что непосредственное восприятие света такого источника дает ощущение максимально возможной насыщенности цвета.

Если на глаз длительное время действовал свет, являющийся дополнительным по отношению к свету с заданной длиной волны, а затем стал действовать свет с заданной длиной волны, то последний кажется более насыщенным по цвету (по крайней мере в течение короткого промежутка времени), чем в том случае, когда он действует один, без дополнительного. Очевидно, что этот процесс связан с явлением цветовой адаптации, хотя в литературе он обычно именуется утомлением; употребление этого термина вряд ли является правильным, так как трудно ожидать, что утомление дает более *высокую* насыщенность цвета монохроматического излучения.

Этот результат легко проверить, если некоторое время наблюдать полоску пурпурного цвета средней интенсивности, а затем перевести взгляд на спроецированный спектр. При совмещении остаточного изображения полоски с зеленым участком спектра насыщенность зеленого цвета покажется значительно большей. Хотя действительный механизм этого явления точно не установлен, однако его можно объяснить с позиций о трех приемниках. Пурпурный

свет возбуждает примерно в равной степени синие и красные приемники, уменьшая их чувствительность. После длительного воздействия чувствительность будет медленно восстанавливаться. Чувствительность зеленых приемников, не подвергавшихся возбуждению, возрастает довольно значительно почти до уровня темновой адаптации по сравнению с двумя другими приемниками. В обычных условиях наблюдения зеленый свет воздействует на все *три* приемника. Следовательно, максимальная насыщенность цвета для глаза, адаптированного к дневному свету, ограничивается определенными значениями отношений чувствительностей трех приемников. Однако если уменьшается чувствительность синих и красных приемников, то возрастает отношение возбуждений зеленых приемников к двум другим, благодаря чему ощущение насыщенности зеленого цвета значительно возрастает.

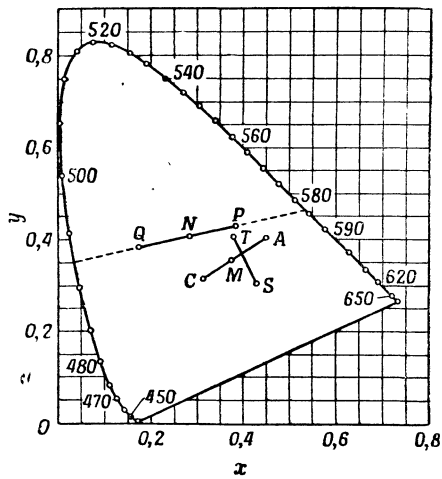
Адаптация

Независимо от того, правильно приведенное объяснение или нет, оно *описывает* те факты, которые наблюдаются. Более того, такой же подход можно распространить и на многие аналогичные явления. Любую адаптацию к окрашенному свету можно рассматривать как сдвиг «белой точки» цветовой системы. Для данного цветового треугольника точка, соответствующая белому цвету, сдвигается в направлении адаптирующего цвета и все цветовые тона и насыщенности преобразуются в *направлении*, указанном этим сдвигом. Эта модификация цветов была приведена автором книги в статье [17], непосредственно связанной с работой Райта по цветовой адаптации. В этой статье использовано также указание Мак-Адама о том, что при принятых допущениях (обобщающих специальные случаи, рассмотренные Райтом) существует только один набор основных цветов, который позволяет правильно рассчитать эти сдвиги. Эти основные цвета должны дать также кривые смешения, которые будут идентичны «истинному» распределению чувствительности для трех приемников глаза. В статье указано, что кривые, полученные Райтом и подтверждающие полученные ранее кривые Кёниг — Дитеричи, достаточно хорошо приближаются к этому идеалу. Для более подробного ознакомления с данным вопросом читателю рекомендуется обратиться к указанной статье, где рассматривается также построение цветового треугольника по Максвеллу и метод расчета, позволяющий приближенно определить, как будут выглядеть все цвета при различных состояниях цветовой адаптации. Эта теория до сих пор еще недостаточно широко испытана и в связи с этим несколько выходит за рамки настоящего рассмотрения [1].

[1] В последние годы был проведен ряд работ, посвященных цветовой адаптации. В результате этих работ выявилось, что явление цветовой адаптации лишь

Интересно провести общее рассмотрение проблемы цветовой адаптации с точки зрения цветового графика МКО. При этом следует иметь в виду, что когда рассматривается *восприятие* цветов в этой чисто психофизической системе, то нередко производится необоснованное расширение основных положений, на которых она базируется.

Когда глаз адаптируется к излучению данного цвета, то это излучение при некоторой яркости всегда будет казаться белым или серым. Так как на графике МКО отсутствует координата яркости, то вычисленные координаты зависят лишь от относительного распределения энергии в спектре источника. В первом приближении точка, соответствующая цветности освещающего источника, может быть принята за точку белого, и по отношению к ней можно оценивать цветности всех других излучений при освещении этим источником света.



Ф и г. 15.6. График цветности для нескольких источников, иллюстрирующий сдвиги цветового тона при изменении адаптации.

Предположим, например, что наблюдатель адаптирован к освещению, изображенному точкой A на цветовом графике МКО (фиг. 15.6). При полной адаптации излучение с отосительным распределением энергии, соответствующим точке A, будет восприниматься как белый свет некоторой яркости. В этом случае для точки M, лежащей между A и C, восприятие будет соответствовать синему цвету, в то время как при адаптации к источнику C точка M будет восприниматься как желтая; на небольших расстояниях от точки, воспринимаемой как белая во всех направлениях, этот метод дает хорошее приближение к действительно наблюдаемым цветам. По мере удаления от белой точки точность метода прогрессивно ухудшается и изменения, вносимые *интенсивностью* света, становятся все более заметными (ср. с эффектом Хелсона — Джадда, описанным в гл. XI).

весьма приближенно может быть объяснено, исходя из простейшей теории, излагаемой автором. Помимо изменения чувствительности приемников глаза, значительную роль в процессе адаптации играет ряд чисто психологических факторов.— *Прим. ред.*

Даже в случае насыщенного цветного освещения благодаря этому методу можно предсказать восприятие цветов, учитывая влияние интенсивности. Предположим, например, что два световых потока изображаются на фиг. 15.6 точками P и Q. При раздельном рассматривании эти цвета будут восприниматься как голубой и желтозеленый. Если свет от этих источников падает на белый экран и наблюдатель смотрит на него в темной комнате, последний будет адаптироваться к цветовой смеси N. Если же между источниками и экраном поместить непрозрачный объект таким образом, чтобы образовались две цветные тени, то каждая тень будет освещена светом только одного источника. Как уже указывалось, эти тени не будут казаться окрашенными независимыми цветами двух источников, а будут в первом приближении восприниматься как имеющие дополнительные цвета. (Здесь понятие дополнительного цвета относится к обычному набору дополнительных цветов по отношению к дневному свету.) В данном случае видимые цвета можно приближенно определить, если считать N точкой белого и продолжить прямую PQ до пересечения с линией спектральных цветов. Воспринимаемые цвета будут близки к цветам этих спектральных линий. Однако это указание относится только к цветовым тонам, а не к насыщенности цветов. Будут видны синий и желтый цвета довольно малой насыщенности. Если два источника соответствуют точкам S и T, то при раздельном наблюдении они будут восприниматься как красный и желтый, а цветные тени после адаптации будут казаться пурпурной и зеленой.

Интересно отметить, что при описанном выше эксперименте цветовая *смесь* будет восприниматься такой, как это можно было бы ожидать, исходя из законов простого аддитивного смешения цветов, т. е. зеленовато-голубой в первом случае и оранжевый во втором, несмотря на очевидную адаптацию, указываемую восприятием теней. Объяснение, по-видимому, может быть дано с позиций эффекта Хелсона — Джадда: более слабая интенсивность, чем представленная, будет восприниматься как серая. Автору всегда казалось, что тщательный количественный анализ этого явления поможет раскрыть многие загадки цветового зрения и приведет к возможности психофизического объяснения всех эффектов, за исключением тех, которые непосредственно определяются психологическими факторами, не связанными непосредственно с распределением энергий (см. гл. IX и XI).

В практической работе часто возникает вопрос о том, как рассчитать цвет заданной пары селективных поверхностей при освещении, отличающемся от дневного. Расчет цвета образцов проводится обычным путем с использованием данных о спектральных коэффициентах отражения и распределения энергии источника A. Если две точки цветового графика, рассчитанные таким образом, совпа-

дают, то оба образца будут одинаковы по цветности для стандартного наблюдателя независимо от условий адаптации глаза. Затруднения в данном примере могут быть частично связаны с определением доминирующей длины волны как такого монохроматического света, который, будучи смешан в нужной пропорции с белым, даст совпадение с данным цветом. Если продолжить прямую, соединяющую точку данного цвета с точкой для источника *C*, до пересечения с линией спектральных цветов, то точка пересечения будет определять ту длину волны, которая при смешении со светом источника *C* будет совпадать с данным цветом. Если провести прямую через точку *A*, то точка пересечения определит длину волны, которая даст совпадение с заданным цветом при смешении со светом источника *A*. Это будет справедливо и для всех других точек цветового треугольника, принимаемых условно за белый свет. Доминирующая длина волны определяет не восприятие цвета, а монохроматическое излучение, которое при смешении даст совпадение по цветности с заданной точкой на графике. Только в тех случаях, когда делается попытка определить цветовое *восприятие*, возникает вопрос о закономерности того или иного *построения*.

Следовательно, при всех возможных условиях цветовой график, например системы МКО, будет полностью описывать психофизические результаты, получаемые при смешении двух или более цветных потоков. В следующей главе будет с такой же очевидностью показано, что цветовой график приносит мало пользы при оценке восприятия реальных окрашенных объектов при цветном освещении.

ГЛАВА XVI

Влияние освещения

В предыдущих главах было показано, что каждой точке цветового треугольника соответствует бесконечное или по крайней мере очень большое число возможных спектральных распределений энергии. Это положение относится, разумеется, к свету любого происхождения — как попадающего в глаз наблюдателя непосредственно от источника света, так и в результате прохождения по сложным отражающим или пропускающим свет каналам. Если вычисление дает для источников света совпадающие координаты цвета излучения, то независимо от их спектрального распределения энергии они будут восприниматься как совпадающие по цвету.

Иногда считают, что если два источника кажутся для глаза совпадающими по цвету, то окрашенные объекты при их освещении будут также казаться совпадающими по цвету. Хотя совершенно ясно, что это неправильно, тем не менее подобные суждения распространены настолько широко, что целесообразно посвятить эту главу анализу подобных явлений, несмотря на то что будут неизбежны повторения уже изложенных положений.

Если два источника света кажутся наблюдателю одинакового цвета, то эти источники возбуждают в одинаковой степени цветовые приемники глаза. Так как ощущение любого цвета зависит в основном от этих соотношений, а не от самого спектрального распределения энергии, то эти источники будут для глаза во всех отношениях *идентичными*. Наблюдатель не может различить эти источники без помощи каких-либо внешних эффектов. Такие чисто визуальные эффекты, как цветовая адаптация, последовательные образы, эффекты контраста и другие, будут идентичными для обоих источников света.

Аддитивные смеси света обоих источников также оказываются неразличимыми для наблюдателя. Аддитивная смесь любого из них со светом любого третьего источника даст, с точки зрения наблюдателя, идентичные цвета, которые он не сможет различить.

Однако, как только произойдет селективное поглощение таких совпадающих по цвету световых потоков, могут немедленно проявиться их различия. Так как цвет всех обычных окрашенных объектов связан либо с селективным отражением или поглощением, либо с люминесценцией, либо с тем и другим, то очевидно, что сопостав-

Цвет объекта, рассматриваемого при освещении двумя разными источниками, может восприниматься по-разному даже в том случае, когда сами источники воспринимаются совершенно одинаково: на верхнем рисунке предметы освещены белым светом от обычной лампы накаливания, на нижнем рисунке освещение производилось двумя источниками с узкой спектральной полосой в сине-зеленой и красной зонах спектра соответственно, которое воспринимается так же, как свет лампы накаливания.

ление цвета излучения двух источников дает очень слабое представление о том, как будут выглядеть объекты, освещенные ими[1]. Единственное исключение составляют, конечно, неселективные нелюминесцирующие поверхности, которые всегда будут казаться идентичными по цвету при освещении любым источником. Однако на практике цветовое равенство даже в этом исключительном случае при условии, что источники освещения сильно различаются по спектру, может не сохраняться, так как цвет объектов, окружающих неселективные поверхности, может сильно изменить воспринимаемый цвет за счет явления одновременного цветового контраста.

В настоящее время существуют искусственные источники света самого различного назначения. В каждом отдельном случае весьма важно произвести правильный выбор типа источника. Поэтому нам кажется полезным взять несколько более или менее произвольных распределений энергии для источников излучения, совпадающих по цвету, и показать, как они повлияют на различные освещаемые ими цвета, путем расчета соответствующих точек цветового графика для каждого источника. Для полноты картины в рассмотрение включены также цвета материалов, обладающих люминесценцией. Ввиду того что в системе МКО одинаковые различия цветов изображаются не одинаковыми отрезками и, следовательно, по такому графику трудно дать количественную оценку некоторых эффектов, то в тех случаях, где это возможно, разности выражены также в преобразованной системе Манселла. Последнее должно помочь читателю в его попытках зрительно представить себе эти различия. При этом сами манселловские цвета предполагаются наблюдаемыми при дневном свете и указанные различия являются лишь приближенными.

Для пояснения сказанного ниже приводятся иллюстрации. На фиг 16.1—16.6 приведены кривые распределения энергии для шести совпадающих по цветности источников. На фиг. 16.7—16.12 даны характеристики отражения шести поверхностей различного цвета. Координаты цветности x и y, приведенные в табл. 1, были определены путем расчета цветности каждой поверхности при независимом ее освещении каждым из шести источников. Коэффициенты Манселла были получены преобразованием цветовых координат системы МКО с использованием данных, опубликованных Подкомитетом

[1] Способность данного источника света придавать цветным объектам определенные цветности называется его цветопередачей. Оценка качества цветопередачи источника света производится путем измерения цвета стандартизированного набора цветных поверхностей при переходе от освещения данным источником света к источнику, выбранному в качестве стандартного, например определенной фазе естественного дневного света. Более подробные сведения о методах оценки цветопередачи источников света приведены в книге В. В. Мешкова [8] (см. список дополнительной литературы).— *Прим. ред.*

Таблица 16.1

Координаты цветности в системе МКО и коэффициенты Манселла для различных гипотетических поверхностей, рассматриваемых при разных источниках, совпадающих с источником *C* системы МКО

Поверхность (см. фиг. 16.7—16.18)	Источник (см. фиг. 16.1—16.6 и 16.13—16.18)	*x*	*y*	Коэффициент отражения по отношению к MgO	Коэффициенты Манселла
A	I	0,3103	0,3170	0,0775	0 3,26/0
	II	0,3026	0,6308	0,5575	9,6 *GY* 7,81/19,6
	III	0,4029	0,5153	0,4233	3,7 *GY* 6,95/10,7
	IV	0,3817	0,5271	0,3934	5,6 *GY* 6,74/11,0
	V	0,4005	0,5117	0,3963	3,8 *GY* 6,76/9,9
	VI	0,3800	0,5544	0,5160	6,4 *GY* 7,56/13,9
B	I	0,3628	0,3117	0,4468	2,6 *R* 7,11/5,8
	II	0,3499	0,3677	0,4902	6,2 *Y* 7,41/2,9
	III	0,3447	0,3511	0,4824	2,5 *Y* 7,35/2,1
	IV	0,3467	0,3493	0,4815	1,5 *Y* 7,34/2,0
	V	0,3458	0,3498	0,4814	1,4 *Y* 7,34/2,2
	VI	0,3413	0,3612	0,4872	8,5 *Y* 7,38/3,0
C	I	0,0732	0,3368	0,3803	... .../...
	II	0,1649	0,0888	0,1239	7,4 *PB* 4,06/24,0
	III	0,1704	0,1371	0,1784	6,6 *PB* 4,78/17,0
	IV	0,3108	0,1851	0,3290	7,8 *P* 6,24/17,4
	V	0,1684	0,1418	0,1843	6,0 *PB* 4,85/16,7
	VI	0,1906	0,1016	0,1396	8,7 *PB* 4,28/20,0
D	I	0,6067	0,2906	0,2951	... .../...
	II	0,4266	0,5210	0,5676	1,8 *GY* 7,87/12,8
	III	0,4719	0,4623	0,4898	2,5 *Y* 7,39/11,8
	IV	0,4799	0,4527	0,4754	1,1 *Y* 7,30/12,2
	V	0,4784	0,4542	0,4767	1,4 *Y* 7,31/11,9
	VI	0,4385	0,5045	0,5425	9,4 *Y* 7,72/12,1
E	I	0,6394	0,2878	0,2733	... .../...
	II	0,5621	0,3352	0,1752	7,5 *R* 4,74/13,6
	III	0,5409	0,3688	0,2447	0,2 *YR* 5,49/12,7
	IV	0,5587	0,3523	0,2378	8,6 *R* 5,42/14,2
	V	0,5506	0,3616	0,2473	9,5 *R* 5,51/13,4
	VI	0,5191	0,3844	0,2226	2,4 *YR* 5,27/10,6

Таблица 16.1 (продолжение)

Поверхность (см. фиг. 16.7—16.18)	Источник (см фиг. 16.1—16.6 и 16.13—16.18)	x	y	Коэффициент отражения по отношению к MgO	Коэффициенты Манселла
F	I	0,3776	0,3105	0,5920	0,4 *R* 8,01/7,5
	II	0,3618	0,2277	0,3179	2,0 *RP* 6,15/14,3
	III	0,3031	0,2528	0,3457	6,4 *P* 6,37/7,6
	IV	0,3243	0,2561	0,3703	9,6 *P* 6,56/9,0
	V	0,3078	0,2573	0,3591	7,2 *P* 6,48/7,5
	VI	0,3022	0,2317	0,30004	6,6 *P* 6,04/10,0

по манселловским цветам Американского оптического общества. В трех случаях коэффициенты Манселла не даны. Это связано с тем, что таблицы для преобразования координат цвета МКО в коэффициенты Манселла построены с использованием в качестве источника освещения стандартного колориметрического источника *A*. В тех случаях, когда используется источник, спектр которого состоит из немногих спектральных линий, для некоторых образцов могут быть получены более высокие значения чистоты цветов, чем приведенные в табл. 16.1.

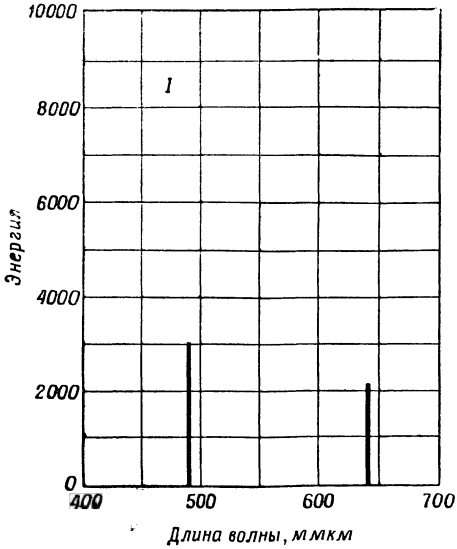
Чтобы проиллюстрировать сдвиг цветности каждого образца при изменении освещения, на фиг. 16.13—16.18 приведены графики МКО для шести различных поверхностей в комбинации с шестью источниками освещения.

С описанными эффектами непосредственно связана проблема так называемых нестабильных или чувствительных цветов. Эта проблема рассматривалась ранее, однако полезно будет ее обсудить с тех же позиций, что и эффекты цветного освещения. Приводимые здесь иллюстрации представляют собой попытку показать сдвиг цветов при освещении одной и той же поверхности светом разных источников.

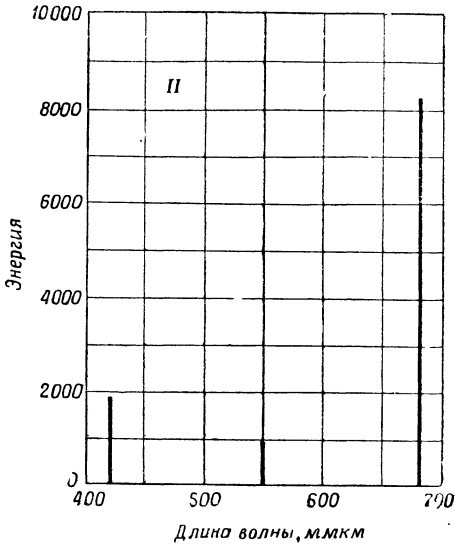
На фиг. 16.19—16.21 показаны спектральные кривые распределения энергии трех источников света: дневного света (источник *C* в системе МКО), лампы накаливания и голубоватой люминесцентной лампы. На цветовом графике фиг. 16.22 показаны цветности этих трех источников в системе МКО.

На фиг. 16.23—16.25 приведены кривые коэффициентов спектрального отражения трех пар образцов, каждый из которых нейтрален при свете источника VII, причем в каждой паре образцы совпадают как по относительной яркости, так и по цветности.

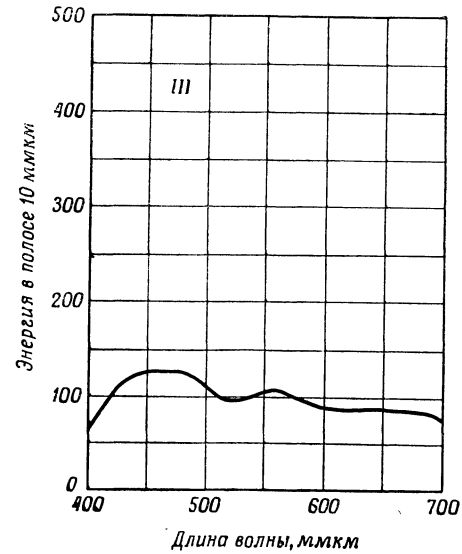
Степень цветовой нестабильности трех совпадающих пар образцов может быть определена путем вычисления их координат цвета



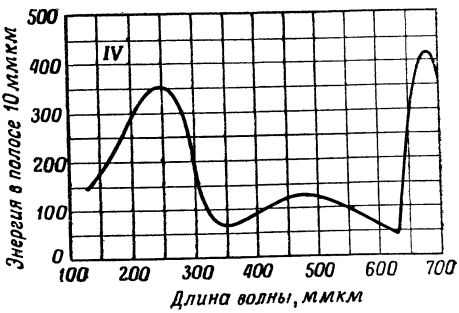
Ф и г. 16.1. Монохроматические линии, которые в сумме совпадают по цвету со стандартным колориметрическим источником *C*.



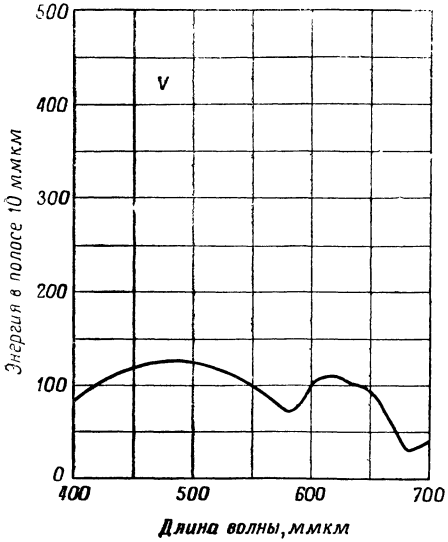
Ф и г. 16.2. Монохроматические линии, которые в сумме совпадают по цвету со стандартным колориметрическим источником *C*.



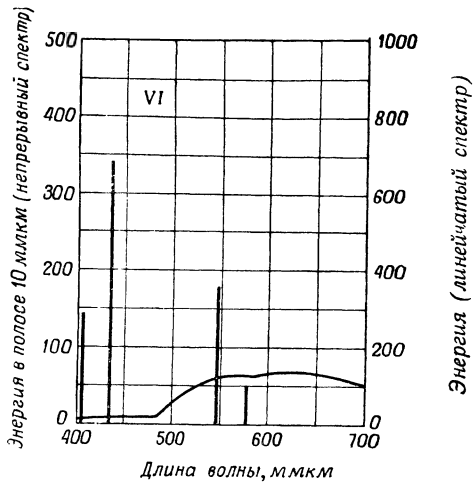
Ф и г. 16.3. Кривая стандартного колориметрического источника *C*.



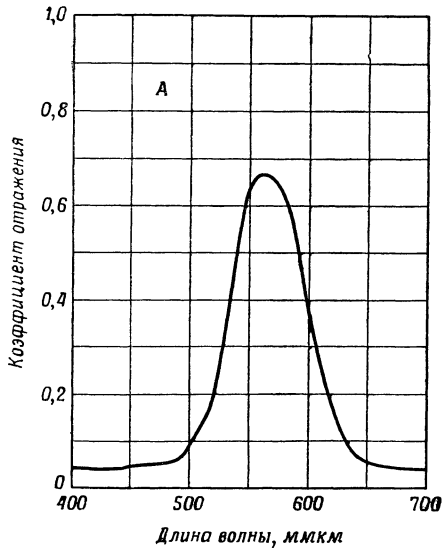
Ф и г. 16.4. Гипотетическое спектральное распределение энергии, совпадающее по цвету со стандартным колориметрическим источником *C*.



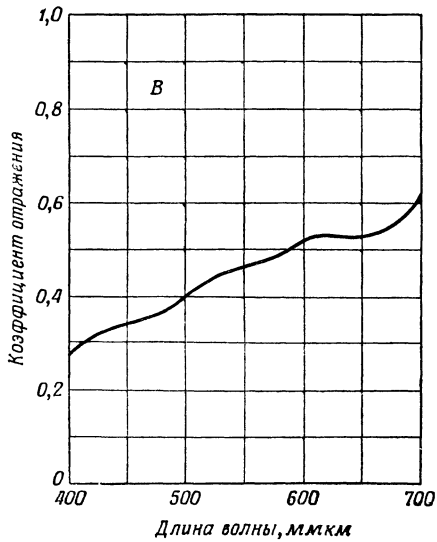
Ф и г. 16.5. Гипотетическое спектральное распределение энергии, совпадающее по цвету со стандартным колориметрическим источником *C*.



Ф и г. 16.6. Комбинация линейчатого и непрерывного спектров, которые в сумме дают совпадение по цвету со стандартным колориметрическим источником *C*.

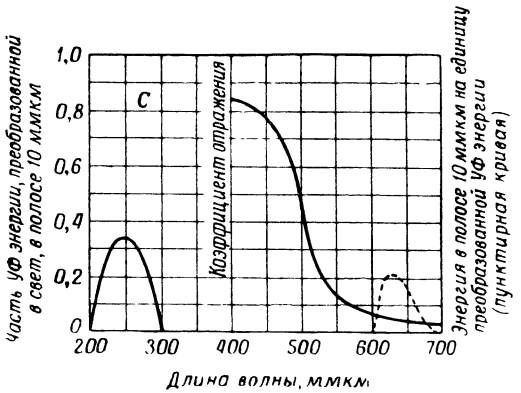


Ф и г. 16.7. Кривая спектральных коэффициентов отражения гипотетической поверхности.



Ф и г. 16.8. Кривая спектральных коэффициентов отражения гипотетической поверхности.

по системе МКО при освещении различными источниками. Так, например, когда пара *G* рассматривается при свете источника VII, то цветности обоих образцов изобразятся точками, совпадающими с точками источников; то же самое будет для пары *H*. Однако при освещении источником VIII образцы пары *G* останутся достаточно хорошо совпадающими, как показано на фиг. 16.26, в то время как

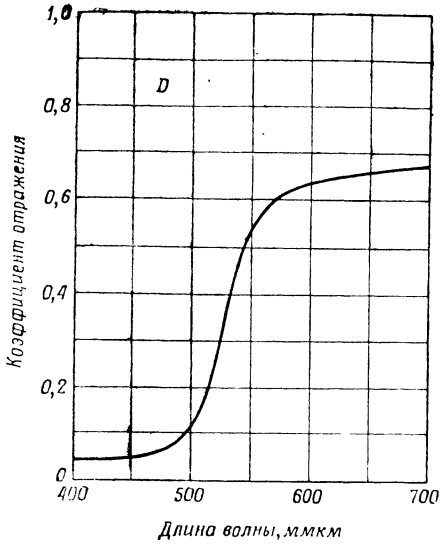


Фиг. 16.9. Кривая спектральных коэффициентов отражения гипотетической поверхности.

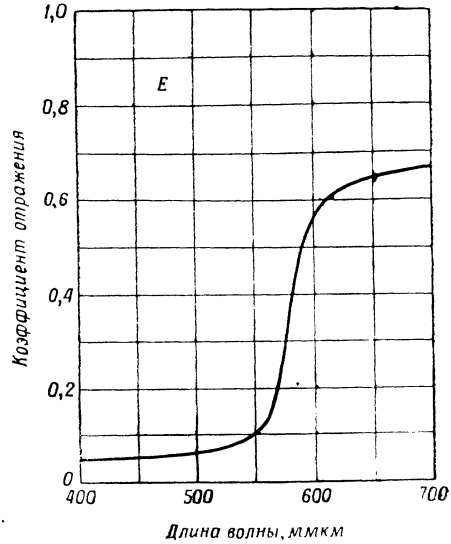
Таблица 16.2

Координаты цветности в системе МКО и коэффициенты Манселла для трех пар поверхностей, которые совпадают при дневном освещении и не совпадают при освещении лампой накаливания или люминесцентной лампой

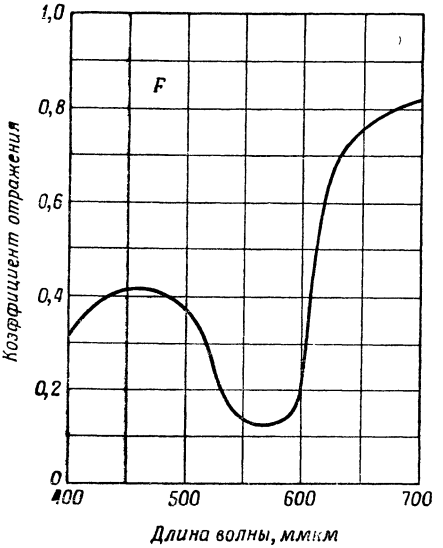
Источник (см. фиг. 16.19—16.22 и 16.26—16.29)	Поверхность (см. фиг. 16.23—16.29)	*x*	*y*	Коэффициент отражения по отношению к MgO	Коэффициенты Манселла
VIII	*Ga*	0,4657	0,3933	0,1573	5,9 *YR* 4,52/6,6
	Gb	0,4500	0,4038	0,1555	8,5 *YR* 4,50/6,0
VIII	*Ha*	0,4721	0,3750	0,1826	2,6 *YR* 4,83/7,4
	Hb	0,4226	0,4327	0,1834	4,9 *Y* 4,84/5,4
VIII	*Ia*	0,5033	0,3535	0,0718	0,4 *YR* 3,14/6,5
	Ib	0,4599	0,3945	0,0697	6,6 *YR* 3,09/4,9
IX	*Ia*	0,3033	0,4421	0,0573	9,9 *GY* 2,80/5,0
	Ib	0,2599	0,2769	0,0655	10,0 *B* 3,04/2,3



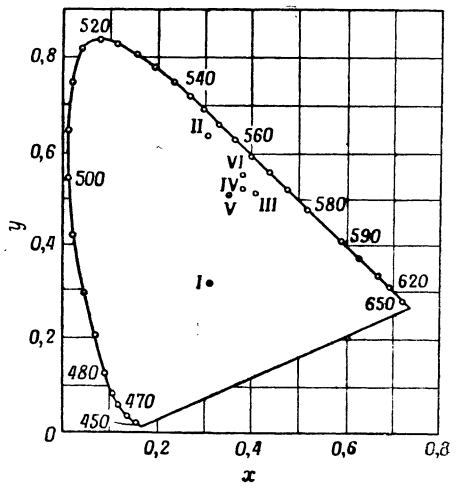
Ф и г. 16.10. Кривая спектральных коэффициентов отражения гипотетической поверхности.



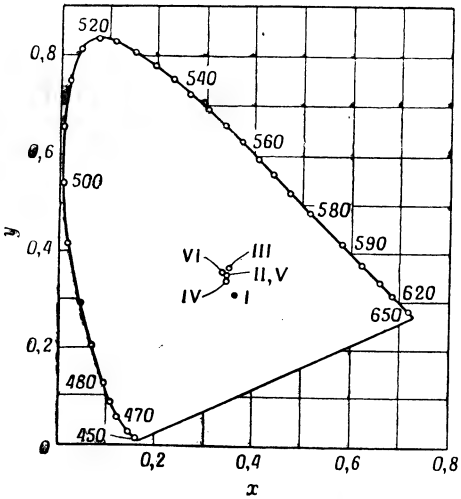
Ф и г. 16.11. Кривая спектральных коэффициентов отражения гипотетической поверхности.



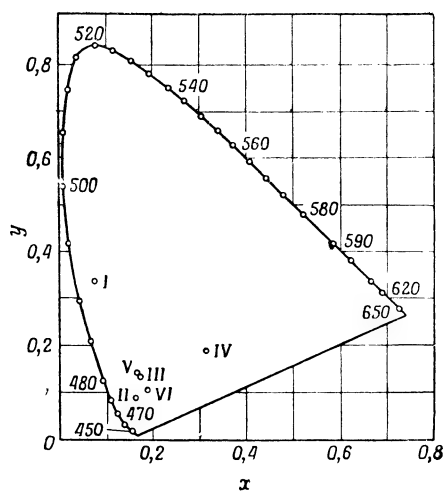
Ф и г. 16.12. Кривая спектральных коэффициентов отражения гипотетической поверхности.



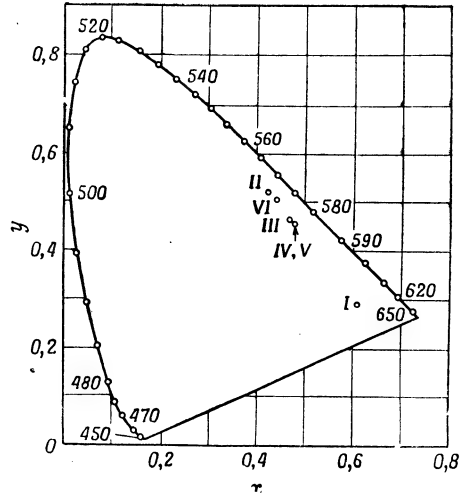
Ф и г. 16.13. Точки на цветовом графике МКО, соответствующие свету, отраженному от поверхности *A* (см. фиг. 16.7), при освещении различными источниками, совпадающими по цвету со стандартным колориметрическим источником *C*.



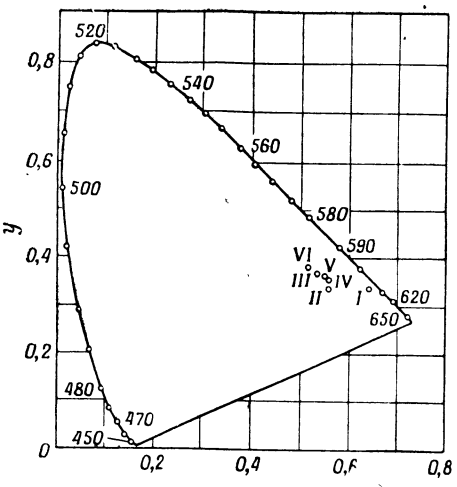
Ф и г. 16.14. Точки на графике МКО для поверхности *B* (см. фиг. 16.8).



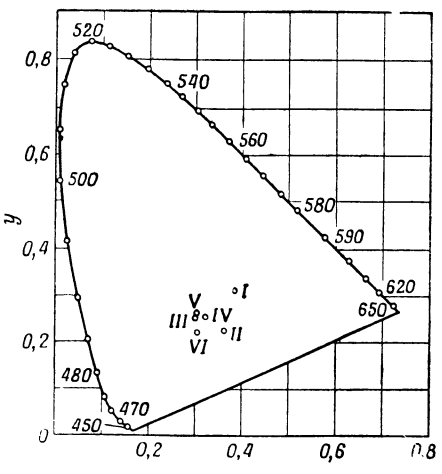
Ф и г. 16.15. Точки на графике МКО для поверхности *C* (см. фиг. 16.9).



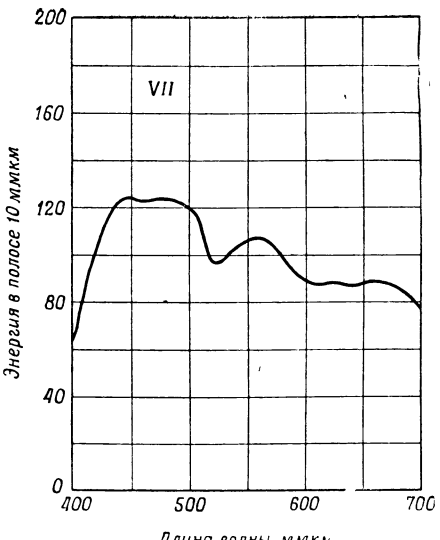
Ф и г. 16.16. Точки на графике МКО для поверхности *D* (см. фиг. 16.10).



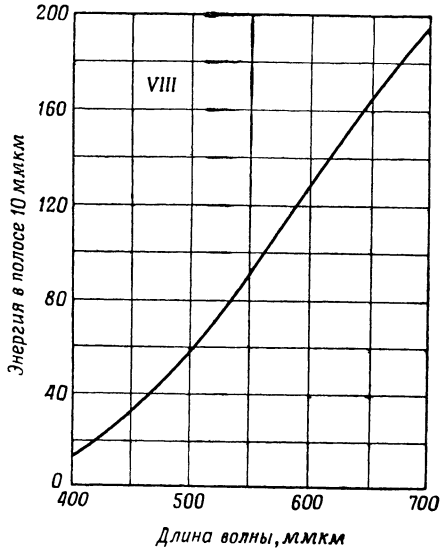
Ф и г. 16.17. Точки на графике МКО для поверхности E (см. фиг. 16.11).



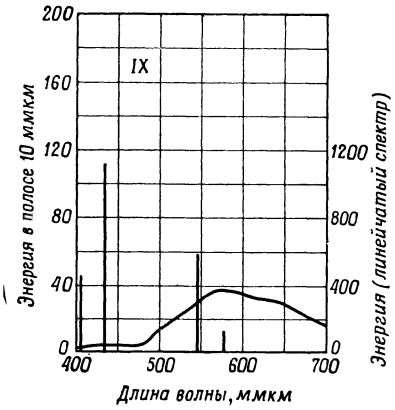
Ф и г. 16.18. Точки на графике МКО для поверхности F (см. фиг. 16.12).



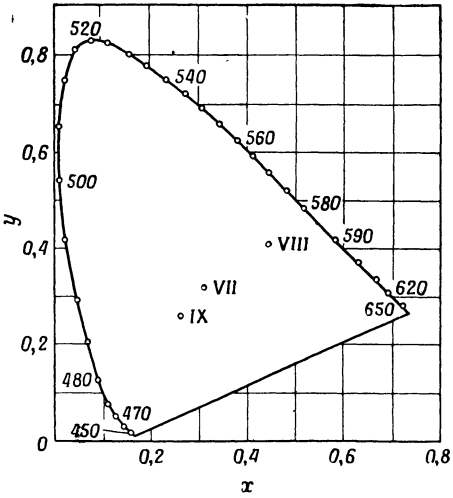
Ф и г. 16.19. Спектрофотометрическая кривая стандартного колориметрического источника C (близко совпадающего с одной из фаз естественного дневного света).



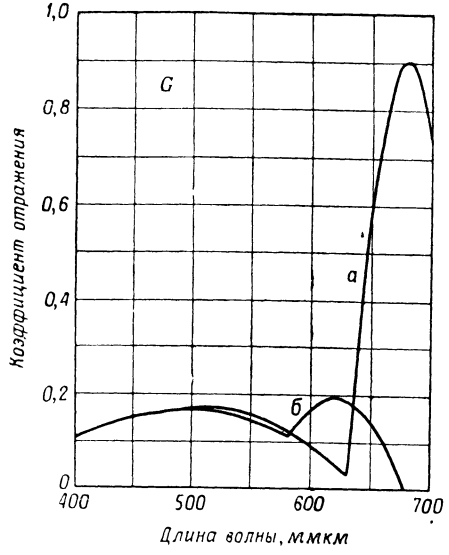
Ф и г. 16.20. Спектрофотометрическая кривая лампы накаливания с вольфрамовой нитью.



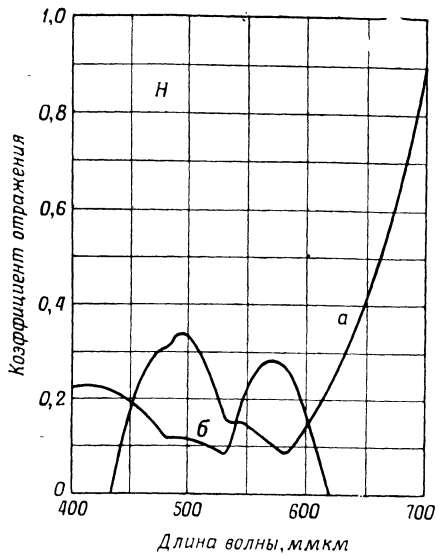
Ф и г. 16.21. Спектрофотометрическая кривая голубоватой люминесцентной лампы.



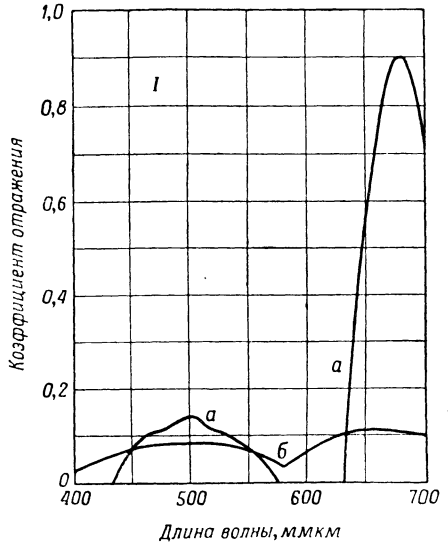
Ф и г 16.22. Точки на цветовом графике МКО для трех источников света, спектрофотометрические кривые которых приведены на фиг. 16.19—16.21.



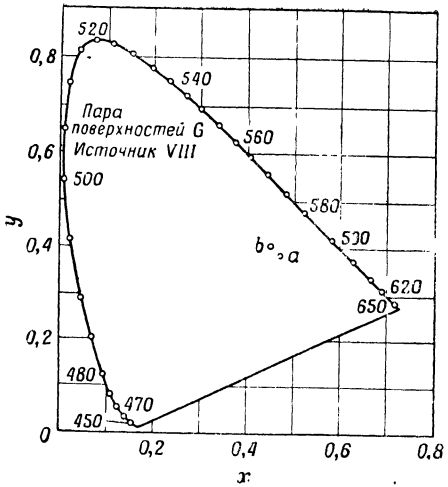
Ф и г. 16.23. Кривые спектральных коэффициентов отражения для поверхностей (пара *G*), совпадающих по цвету при дневном освещении.



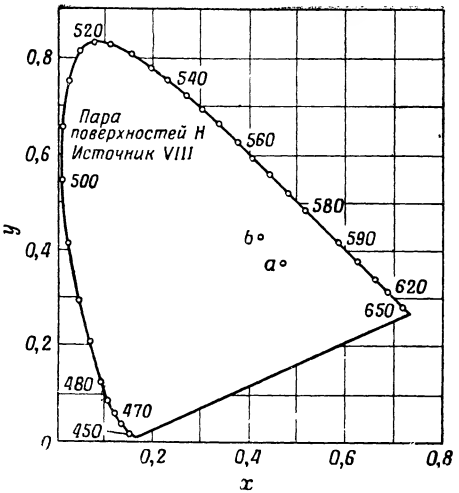
Ф и г. 16.24. Кривые спектральных коэффициентов отражения для поверхностей (пара *H*), совпадающих по цвету при дневном освещении.



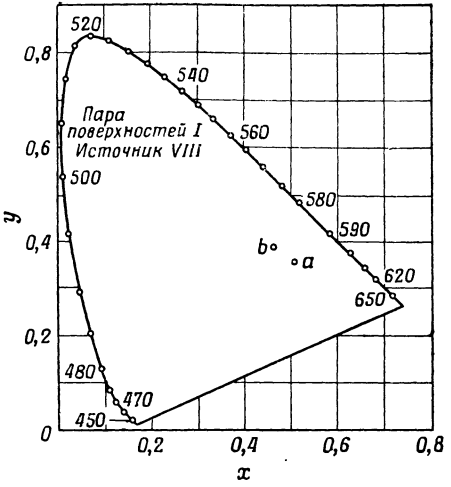
Ф и г. 16.25. Кривые спектральных коэффициентов отражения для поверхностей (пара *I*), совпадающих при дневном освещении.



Ф и г. 16.26. Цветовой график МКО для пары *G* при освещении лампой накаливания.



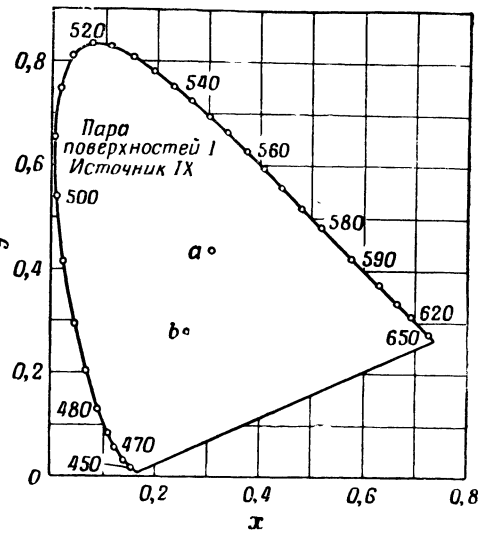
Ф и г. 16.27. Цветовой график МКО для пары *H* при освещении лампой накаливания.



Ф и г. 16.28. Цветовой график МКО для пары *I* при освещении лампой накаливания.

пара *H* покажет довольно большое цветовое различие между двумя поверхностями, как показано на фиг. 16.21. Из этого можно сделать вывод, что пара *H* является значительно более нестабильной по отношению к источнику VIII, чем пара *G*.

Возможная нестабильность образцов, наблюдаемых последовательно при освещении источниками VII—IX, иллюстрируется на примере поверхностей пары *I*. Как уже указывалось, при наблюдении под источником VII обе поверхности нейтральны. Однако при освещении источником VIII их цветность изменяется, как показано на фиг. 16.28, а при рассматривании при голубоватом освещении люминесцентного источника IX совпадение между ними полностью нарушается (фиг. 16.29). Этот пример иллюстрирует резко выраженную нестабильность цвета пары по отношению к люминесцентному освещению.



Ф и г. 16.29. Цветовой график МКО для пары *I* при освещении голубоватой люминесцентной лампой.

Результаты расчетов вместе с данными об относительной светлоте и коэффициентами Манселла сведены в табл. 2.

В заключение полезно дать некоторые дополнительные пояснения к описанным иллюстрациям и предупредить читателя о возможности их неправильной интерпретации. Все приведенные примеры даны лишь в качестве иллюстраций к проблеме и были специально подобраны для этой цели. Для упрощения были опущены все соображения, связанные с адаптацией; однако необходимо иметь в виду, что они играют важную роль в практических ситуациях. Подробное рассмотрение для используемых на практике цветов дано в статье Никкерсон [64].

ГЛАВА XVII

Смеси прозрачных окрашенных сред

Законы, лежащие в основе смешения прозрачных окрашенных сред, могут быть сформулированы весьма просто. Однако практические выводы из этих законов можно сделать только при тщательном рассмотрении свойств ряда реальных окрашенных сред.

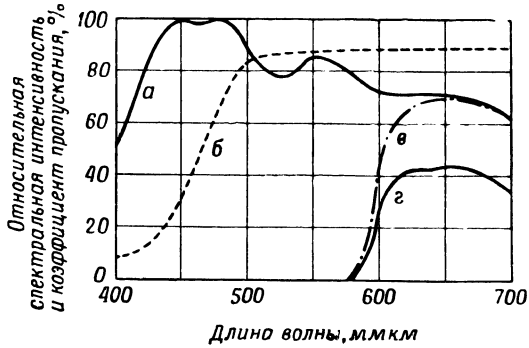
Материалы с последовательным поглощением

Термин «субтрактивное смешение двух окрашенных сред» применяется всякий раз, когда световое излучение подвергается воздействию двух или более избирательно поглощающих материалов. В большинстве случаев результат избирательного поглощения несколькими материалами будет одним и тем же независимо от того, протекает ли этот процесс одновременно или последовательно, причем в любом порядке. Исключения из этого положения встречаются в случаях, когда рассматриваемые вещества в значительной степени рассеивают свет, являются люминесцирующими или при смешении оказывают друг на друга химическое воздействие.

Основные правила, по которым производится расчет спектральных характеристик в этих случаях, были изложены в одной из предыдущих глав. Они заключаются в последовательном перемножении данных о процентном пропускании или отражении для каждой длины волны на соответствующие данные о спектре излучения источника света. На фиг. 17.1 кривая *а* характеризует спектральное распределение энергии источника света, кривая *б* — спектральное пропускание светофильтра и кривая *в* — спектральное пропускание другого светофильтра. Кривая *г* показывает относительное распределение энергии источника света, характеризующегося кривой *а*, после того как свет прошел через светофильтры *б* и *в*. Результирующая кривая была получена путем последовательного умножения значений величин энергии, представленных кривой *а*, на значения величин процентного пропускания, представленных кривыми *б* и *в*, для каждой длины волны.

Как было подробно показано в двух предыдущих главах, наблюдаемый цвет предмета не определяет однозначно распределение энергии отраженного излучения. Отсюда следует, что предсказать результат последовательного действия двух окрашенных тел или ок-

рашенных сред на излучение источника на основе только внешнего вида рассматриваемых объектов совершенно невозможно. Этот факт *может* быть легко продемонстрирован на примере трех обычных репродукционных светофильтров. Так, на фиг. 17.2 показаны кривые спектрального пропускания — кривая *а* для светофильтра



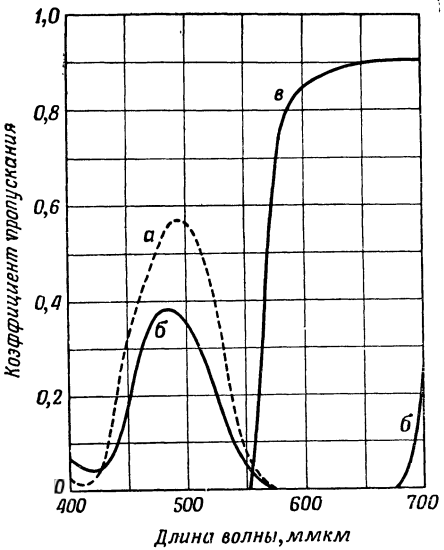
Ф и г. 17.1. Кривые, показывающие результаты последовательного действия светофильтра на характеристику излучения источника *С*.

№ 44 и *б* — для светофильтра № 68. Когда рассматривают эти светофильтры на просвет при дневном освещении, они кажутся очень похожими. Если же рассматривать их на просвет, поместив рядом, а затем перекрыть светофильтром № 22, (кривая спектрального пропускания которого на фиг. 17.2 обозначена как *в*), произойдет поразительное превращение. Свет, прошедший через сложенные светофильтры № 68 и 22, становится темно-красным. Его спектральная характеристика показана кривой *б* на фиг. 17.3. В то же время свет, прошедший через комбинацию светофильтров № 44 и 22, становится темно-зеленым, что показано кривой *а* на фиг. 17.3.

Описанный здесь эффект еще более поразителен, когда демонстрация производится в затемненной комнате с помощью обычного проекционного аппарата. Можно привести множество подобных примеров. Таким образом, цвет излучения, полученный в результате субтрактивного смешения, зависит от: а) спектрального распределения энергии рассматриваемого источника света; б) спектрального поглощения окрашенных сред; в) условий наблюдения. Для правильного понимания цветовых явлений необходимо постоянно принимать во внимание эти факторы и при этом правильно различать случаи аддитивного и субтрактивного смешения цветов.

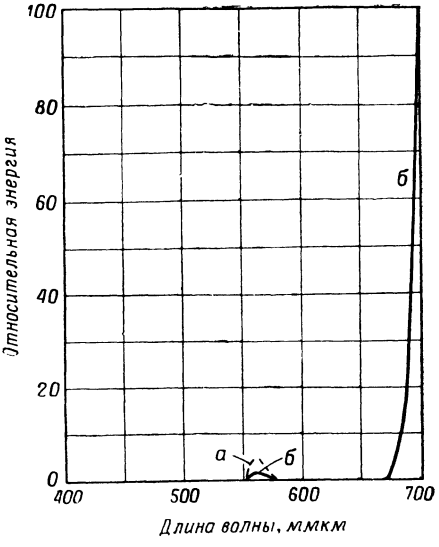
Результат любого вида изменения цветов и в том числе субтрактивного смешения может быть подсчитан в системе МКО или другой подобной системе и нанесен на двухмерный цветовой график,

если возможно рассчитать распределение энергии света, достигшего глаза наблюдателя. Однако если на цветовом графике указаны



Ф и г. 17.2. Кривые спектрального пропускания трех светофильтров Раттен.

а — № 44; *б* — № 68; *в* — № 22.



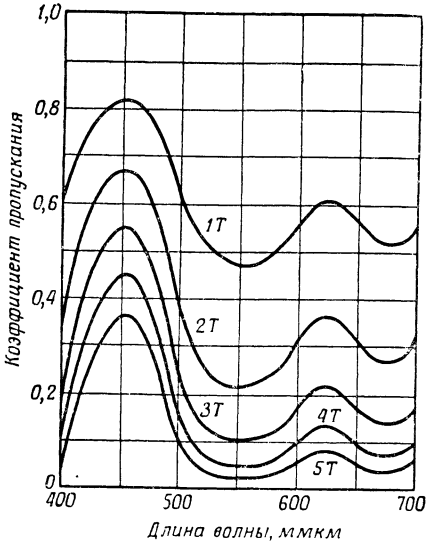
Ф и г. 17.3. Относительное спектральное распределение энергии дневного света, прошедшего через попарно сложенные светофильтры Раттен.

а — для светофильтров № 44 и 22; *б* — для светофильтров № 68 и 22.

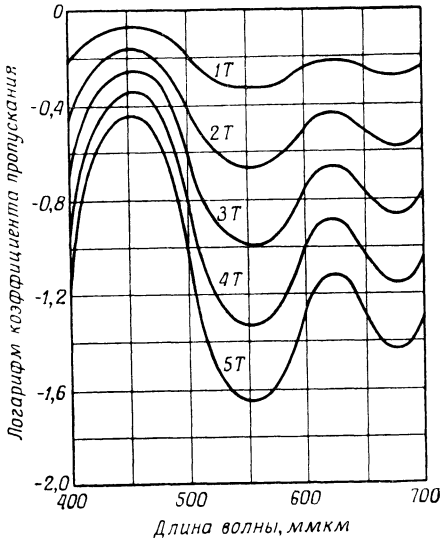
лишь точки, соответствующие цветностям окрашенных сред, то цвет их смеси может быть определен только в случае аддитивного, а не субтрактивного смешения.

Законы Бугера и Бэра

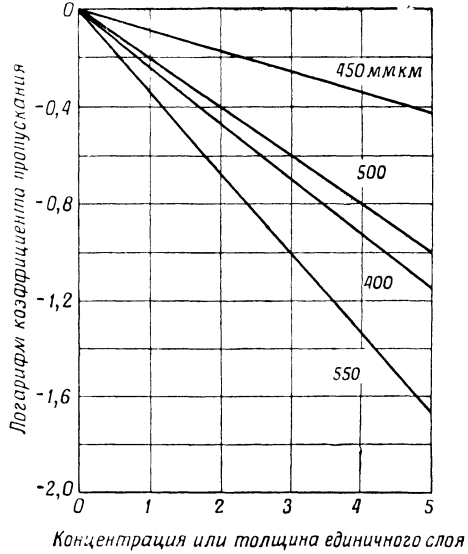
Как уже кратко упоминалось в гл. V, двумя основными законами для избирательно-поглощающих материалов являются законы Бугера и Бэра. Напомним, что закон Бугера утверждает, что если для какой-либо длины волны пропускание при единичной толщине слоя равно величине T, то для данной длины волны при толщине слоя n пропускание света равно величине T^n. Предположим, что каждый слой пропускает 10% падающего на него света данной длины волны и общая толщина содержит три таких слоя, тогда общее пропускание для данной длины волны составит 0,1%. Если толщина увеличилась до четырех слоев, т. е. если добавлен еще один такой же слой, пропускание составит 0,01% и т. д.



Ф и г. 17.4. Кривые спектрального пропускания некоторого окрашенного прозрачного материала при пяти толщинах T единичного слоя.



Ф и г. 17.5. Логарифмы коэффициентов спектрального пропускания для окрашенного материала (фиг. 17.4).



Ф и г. 17.6. График, иллюстрирующий линейную зависимость между толщиной (или концентрацией) и прозрачностью для нескольких различных длин волн.

Закон Бэра аналогичен рассмотренному, но относится к концентрации красителя в слое данной толщины. Предположим, что краситель растворен в таком растворителе, как вода или пластмасса. Общее количество красителя, содержащееся в данном объеме, может быть подсчитано в каких-либо единицах концентрации, например в граммах на 1 *л*. Если в рассматриваемой толщине содержатся 3 единицы концентрации и каждая единица при данной толщине слоя пропускает 10% света данной длины волны, то прошедший свет составляет, как и раньше, 0,10% падающего света. Увеличение концентрации до четырех единиц без изменения толщины слоя снизит количество прошедшего света до 0,01% и т. д. Оба эти закона широко исследованы.

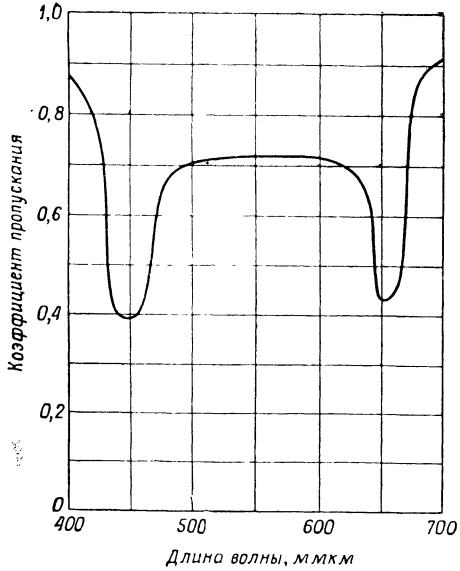
Хотя в ряде случаев имеют место отдельные исключения, все же эти законы довольно точны для всех прозрачных материалов и должны рассматриваться как основные при субтрактивных процессах. Можно легко проиллюстрировать практическое применение этих законов. Если построить зависимости логарифма коэффициента пропускания от концентрации для каждой длины волны, то получим ряд прямых линий различного наклона.

На фиг. 17.4—17.6 приведены характеристики пропускания для произвольной прозрачной среды.

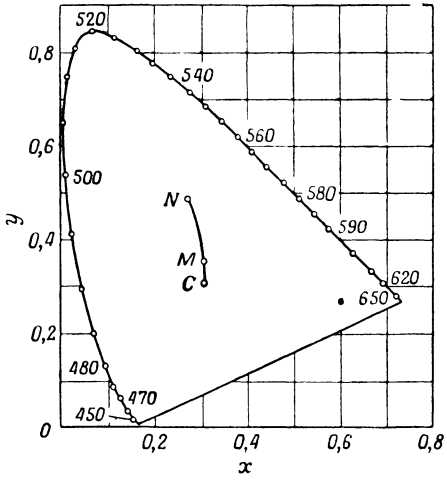
На фиг. 17.4 приведены кривые пропускания для разных толщин рассматриваемого раствора. На фиг. 17.5 показана зависимость логарифма коэффициента пропускания от длины волны для той же группы толщин. Использование логарифма коэффициента пропускания вместо коэффициента пропускания сделало расстояние между кривыми более равномерным. На фиг. 17.6 показаны те же величины, нанесенные на график таким образом, чтобы было видно, как логарифм коэффициента пропускания зависит от толщины слоя для различных длин волн.

Зависимость цветности от толщины слоя и концентрации красителя

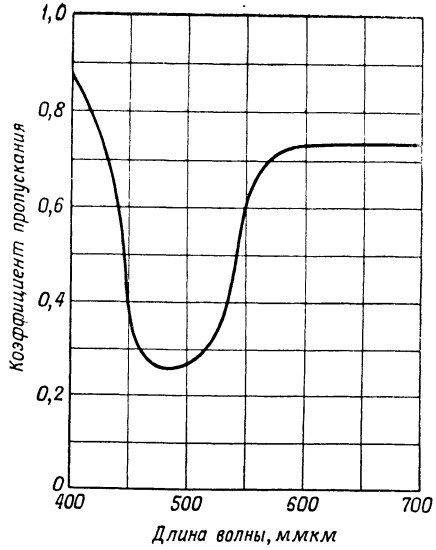
Таким образом, при изменениях толщины слоя или концентрации красителя прозрачные окрашенные среды следуют довольно определенным законам. В случае, если получена спектрофотометрическая кривая пропускания для какой-то толщины и концентрации, то с помощью указанных закономерностей можно рассчитать кривую для других условий. Следовательно, ряд состояний для такого красителя проходит через четко установленную группу цветов, и такой ряд, который может быть условно назван рядом закона Бэра, имеет важное значение. Предположим, что какой-то краситель имеет кривую пропускания, показанную на фиг. 17.7, и что эта кривая соответствует некоторой определенной концентрации и толщине.



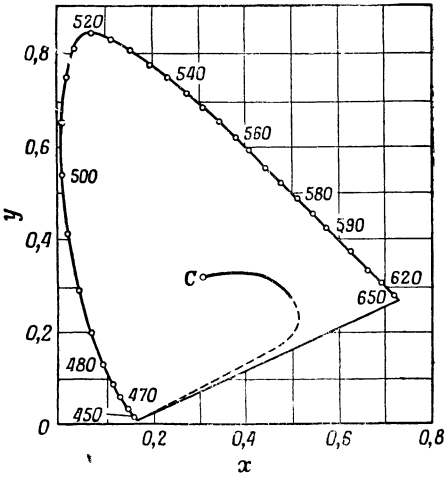
Ф и г. 17.7. Кривая спектрального пропускания некоторого гипотетического красителя при единичной концентрации.



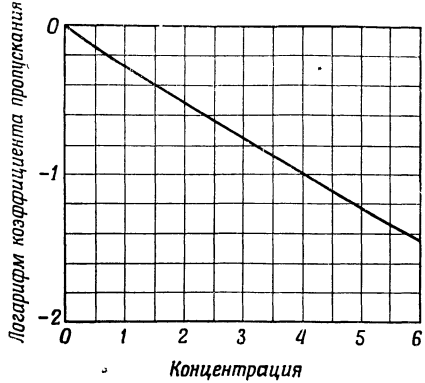
Ф и г. 17.8. Линия цветности красителя, кривая спектрального пропускания которого показана на фиг. 17.7, при изменении концентрации от 0 до величины, в 8 раз превышающей концентрацию красителя, при которой получена кривая фиг. 17.7.



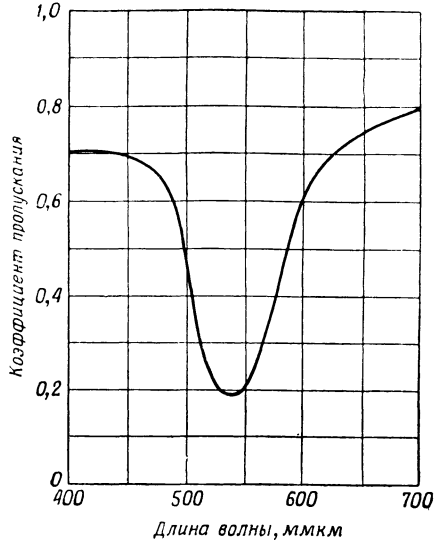
Ф и г. 17.9. Кривая спектрального пропускания гипотетического красного красителя при единичной концентрации.



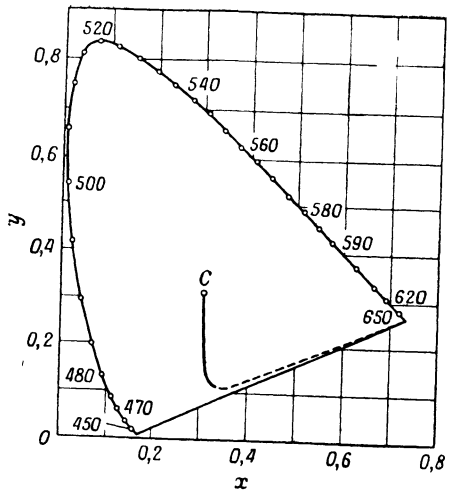
Ф и г. 17.10. Линия цветности для красителя, показанного на фиг. 17.9.



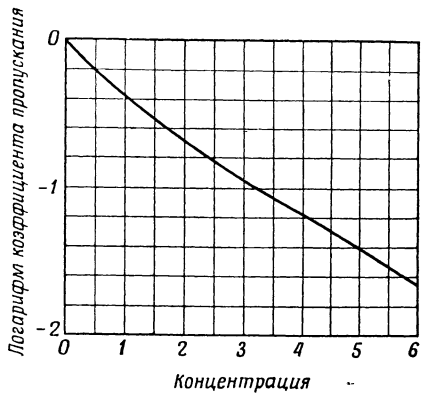
Ф и г. 17.11. Кривая пропускания красителя, показанного на фиг. 17.9, при различных концентрациях.



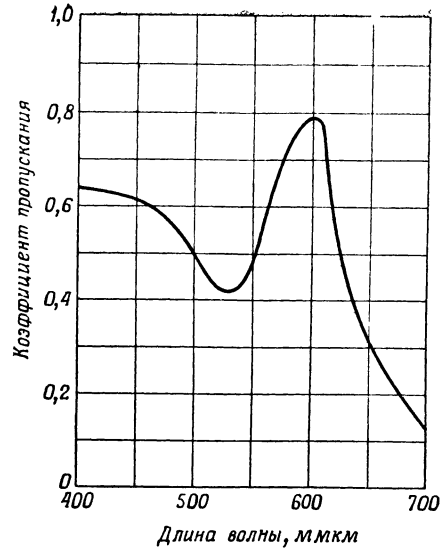
Ф и г. 17.12. Кривая спектрального пропускания гипотетического сине-фиолетового красителя при единичной концентрации.



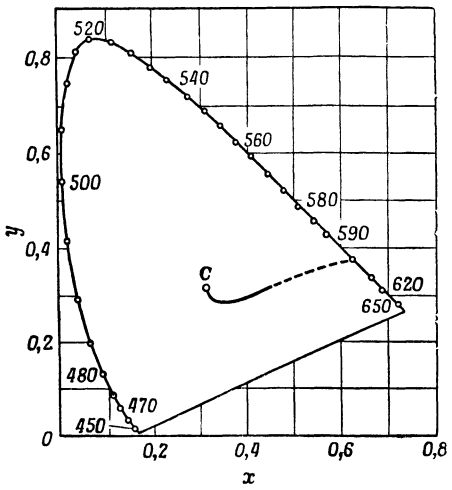
Ф и г. 17.13. Линия цветности для красителя, показанного на фиг. 17.12.



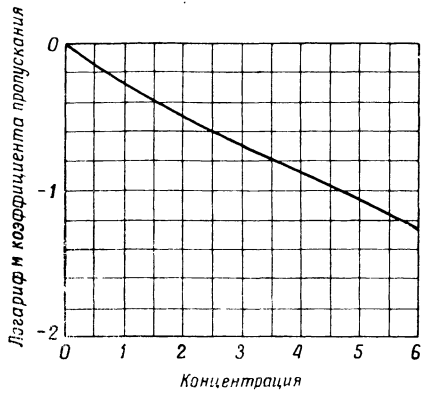
Ф и г. 17.14. Кривая пропускания красителя, показанного на фиг. 17.12.



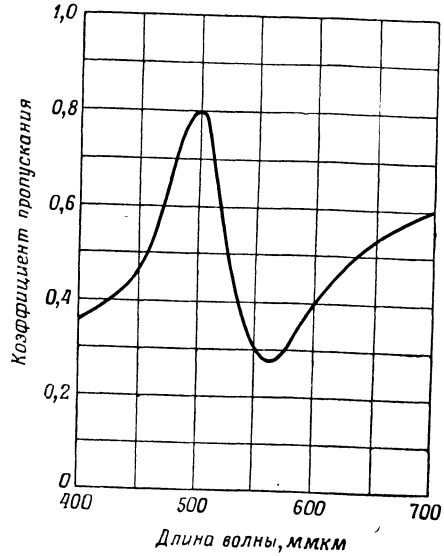
Ф и г. 17.15. Кривая спектрального пропускания гипотетического пурпурного красителя при единичной концентрации.



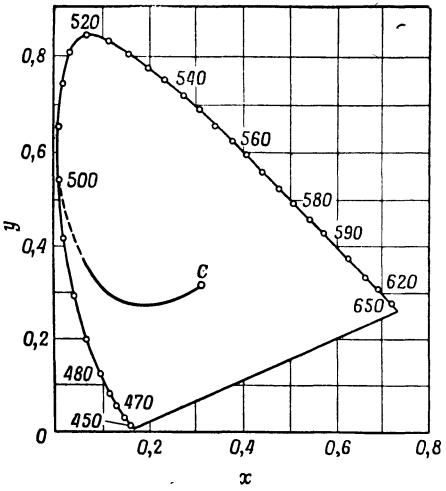
Ф и г. 17.16. Линия цветности для красителя, показанного на фиг. 17.15.



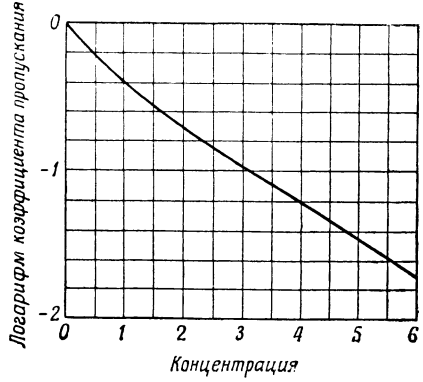
Ф и г. 17.17. Кривая пропускания для красителя, показанного на фиг. 17.15.



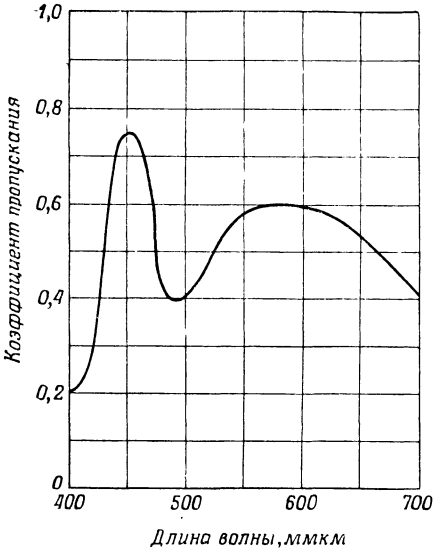
Ф и г. 17.18. Кривая спектрального пропускания гипотетического сине-зеленого красителя при единичной концентрации.



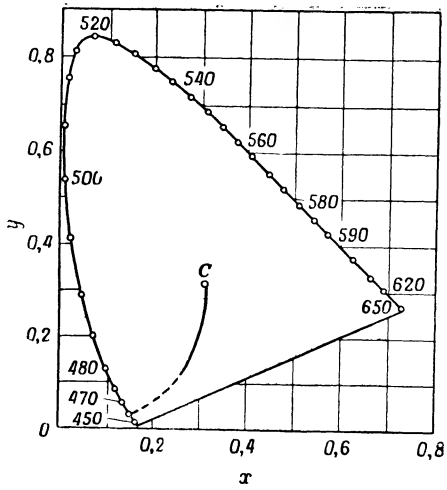
Фиг. 17.19. Линия цветностей для красителя, показанного на фиг. 17.18.



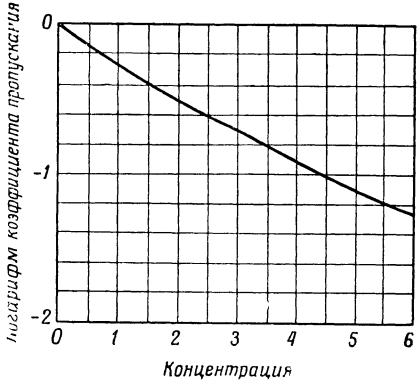
Фиг. 17.20. Кривая пропускания красителя, показанного на фиг. 17.18.



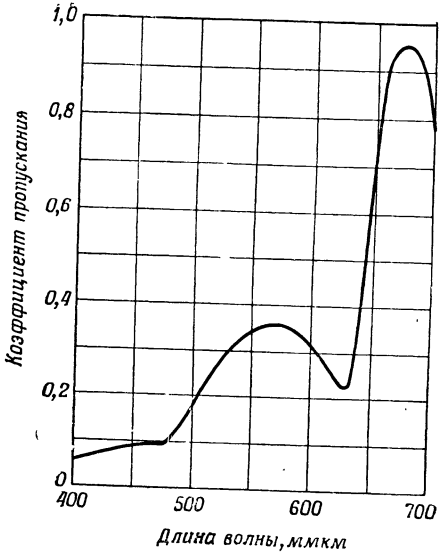
Фиг. 17.21. Кривая спектрального пропускания гипотетического фиолетового красителя при единичной концентрации.



Ф и г. 17.22. Линия цветности для красителя, показанного на фиг. 17.21.

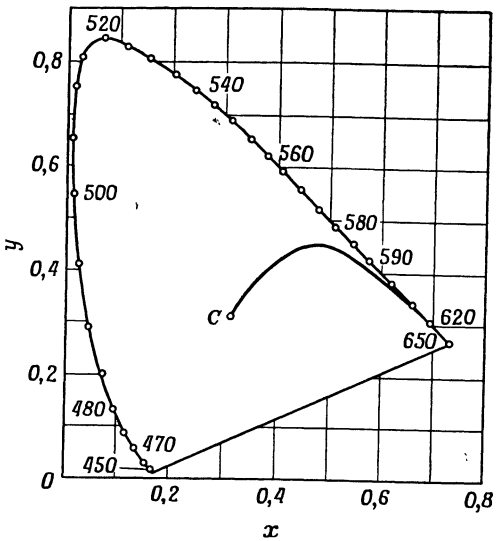


Ф и г. 17.23. Кривая пропускания для красителя, показанного на фиг. 17.21.



Ф и г. 17.24. Кривая спектрального пропускания гипотетического желтого красителя при единичной концентрации.

Цвет излучения источника *C*, пропущенный этим красителем, может быть подсчитан в системе МКО, и соответствующую ему точку можно нанести на цветовой график (точка *M* на фиг. 17.8). При нулевой концентрации или толщине пропускание раствора, безусловно, составило бы 100% для всех длин волн; следовательно, нулевая точка совпадает с точкой источника света *C*. Цветности, соответствующие



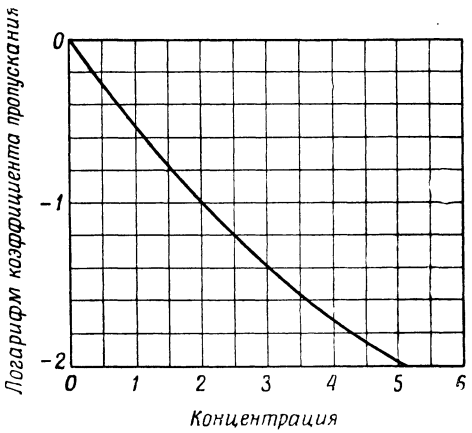
Ф и г. 17.25. Линия цветности для красителя, показанного на фиг. 17.24.

возрастающим величинам концентрации, будут изображаться на цветовом графике линией *CMN*. Заметьте, что линия эта кривая, а не прямая. Это общее свойство подобных рядов. В общем случае, когда меняется толщина или концентрация прозрачного красителя, меняются все три цветовые характеристики.

Так как существует бесконечное множество возможных спектрофотометрических кривых, соответствующих данному цвету, *очертания кривых, удовлетворяющих закону Бэра*, на цветовом графике могут иметь почти любую форму со следующими ограничениями: а) они начинаются в точке, соответствующей цвету источника света; б) точки кривых при возрастании концентрации постепенно перемещаются по направлению к спектральной кривой по непрерывной траектории. На фиг. 17.9 — 17.26 показано несколько различных типичных кривых, удовлетворяющих закону Бэра, вместе с спектрофотометрическими кривыми и относительными яркостями соответствующих красителей. Пунктирные участки этих кривых

представляют собой экстраполяции, исходящие из точек расчетных значений, соответствующих концентрации красителя в 8 единиц по направлению к точке, соответствующей предельной концентрации, при которой все пропущенное излучение сосредоточено в длине волны максимума спектрофотометрической кривой красителя в единичной концентрации.

Хотя красители, кривые отражения которых показаны на этих рисунках, не являются реальными в том отношении, что они не представляют собой результатов каких-либо спектральных измерений, но они реальны в том смысле, что показанное распределение энергии даст именно те цвета, которые нанесены на цветовой график. Эти кривые снова иллюстрируют столь часто упоминаемое положение, что свойства красителя не могут быть определены по его видимому цвету. Смеси прозрачных окрашенных сред действуют так же, как и отдельные красители, поскольку дело идет о свойствах, подчиняющихся законам Бугера и Бэра, которые не зависят от того, является ли окрашенная среда химически простой или сложной; если соотношение составных частей остается постоянным, смесь будет действовать как единый краситель.



Ф и г. 17.26. Зависимость оптической плотности от концентрации красителя, показанного на фиг. 17.24.

Кривые показывают также, что при увеличении концентрации или толщины прозрачной окрашенной среды чистота цвета возрастает и цветность приближается к цветности монохроматических излучений. В общем случае предельная длина волны, полученная таким образом, соответствует длине волны максимума кривой спектрального пропускания раствора независимо от того, какую цветность имеет раствор при низких концентрациях. Цветовой график МКО, однако, не показывает того факта, что при очень высоких концентрациях общее количество света, которое пропускает краситель, становится чрезвычайно низким. Чтобы проиллюстрировать это положение, наряду с другими данными приведены относительные яркости света, пропущенного красителями при различных концентрациях. Относительная яркость нанесена на график в логарифмическом масштабе отчасти для того, чтобы поместить большее коли

чество кривых на графиках, и потому, что визуальные яркостные различия почти пропорциональны их логарифмам. Надо отметить, что эти линии не прямолинейны. Общее пропускание окрашенной среды не подчиняется законам Бугера и Бэра. Эти законы приложимы только к монохроматическому пропусканию.

Интенсивность света

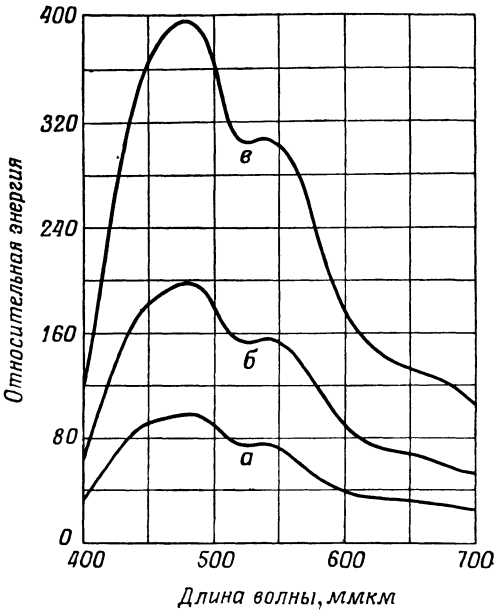
Кривые спектрального пропускания красителей поясняют положения, которые часто не учитываются при колориметрических расчетах. Если такая кривая для красителя построена в линейном масштабе с максимумом пропускания 100%, то величины пропускания, меньшие 1%, на графике будет трудно различить.

При увеличении толщины слоя почти вся кривая может опускаться ниже линии пропускания для 1%. Однако не следует полагать, что форма спектрофотометрической кривой красителя в данном случае несущественна. Слой красителя может давать очень насыщенный цвет и все же иметь пропускание не выше 1%.

Следует иметь в виду тот факт, что наблюдатель воспринимает полное излучение, прошедшее через слой красителя, и это излучение зависит как от его кривой спектрального пропускания, так и от интенсивности излучения источника света, которая не показана на приведенных рисунках. Поэтому правильнее вместо кривой спектрального пропускания построить кривую распределения энергии в спектре излучения, пропущенного красителем, в соответствующем масштабе. На фиг. 17.27, например, кривая *а* показывает относительную энергию, пропущенную данным светофильтром при использовании источника света произвольной интенсивности. Кривая *б* построена для того же светофильтра, но при увеличении интенсивности источника света в 2 раза, а кривая *в* — в 4 раза.

Глаз воспринимает все эти излучения как излучения одинаковой цветности, но различной яркости. Таким образом, очень плотный краситель может дать высоко насыщенный цвет. Цветовые восприятия зависят от интенсивности пропущенного света и состояния адаптации глаза наблюдателя. Можно допустить серьезные ошибки при оценке цвета, пропущенного красителем, если не принимать во внимание это обстоятельство. В каталогах светофильтров обычно используется метод построения спектрофотометрических кривых, позволяющий избежать подобных ошибок и имеющий ряд других преимуществ. При построении одного из семейств кривых и в ряде других случаев вместо величины пропускания уже была использована величина логарифма пропускания. Большое преимущество логарифмического масштаба заключается в том, что в этом масштабе относительные различия между кривыми имеют одну и ту же величину независимо от абсолютных значений пропускания.

Так, если для одной длины волны величина пропускания в 2 раза больше, чем для другой, то расстояние по вертикали между этими двумя величинами будет одним и тем же независимо от того, равна



Ф и г. 17.27. Кривые спектрального распределения энергии излучениия источника *С* после прохождения через сине-зеленый краситель произвольной концентрации.

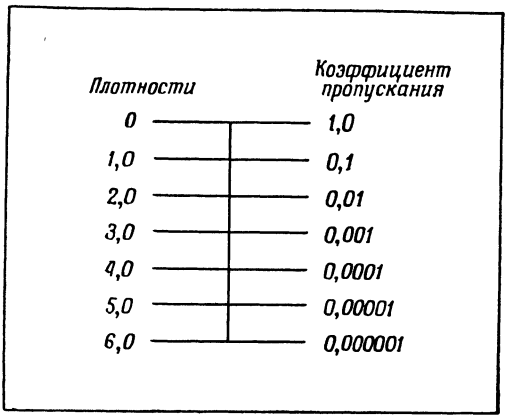
Кривые *б* и *в* соответствуют увеличению интенсивности падающей энергии соответственно в 2 и 4 раза по сравнению с показанной на кривой *а*.

ли одна величина 90%, а другая — 45% или одна составляет 1%, а другая — 0,5%. Логарифмический масштаб удобно использовать также в тех случаях, когда речь идет о поглощении, а не о пропускании.

Соответственно этому обычно строят такие кривые в обратном логарифмическом масштабе и обозначают единицы масштаба как плотность, а не как логарифм пропускания. (Те, кто знаком с фотографической сенситометрией, знают, что это то же самое, что и понятие плотности). Ноль в логарифмическом масштабе эквивалентен единице в линейном масштабе пропускания; 1, 2, 3,... соответствуют 0,1; 0,01; 0,001;.... Пропускания, соответствующие плотностям до величины 6, показаны на фиг. 17.28.

Таким образом, видно, что плотность красителя при излучении любой данной длины волны зависит от двух переменных: удельной спектрофотометрической кривой красителя и его толщины или концентрации.

На фиг. 17.29 сделана попытка показать зависимость между этими тремя величинами для красителя, показанного на фиг. 17.4. На этом



Ф и г. 17.28. Соотношение между плотностью и пропусканием.

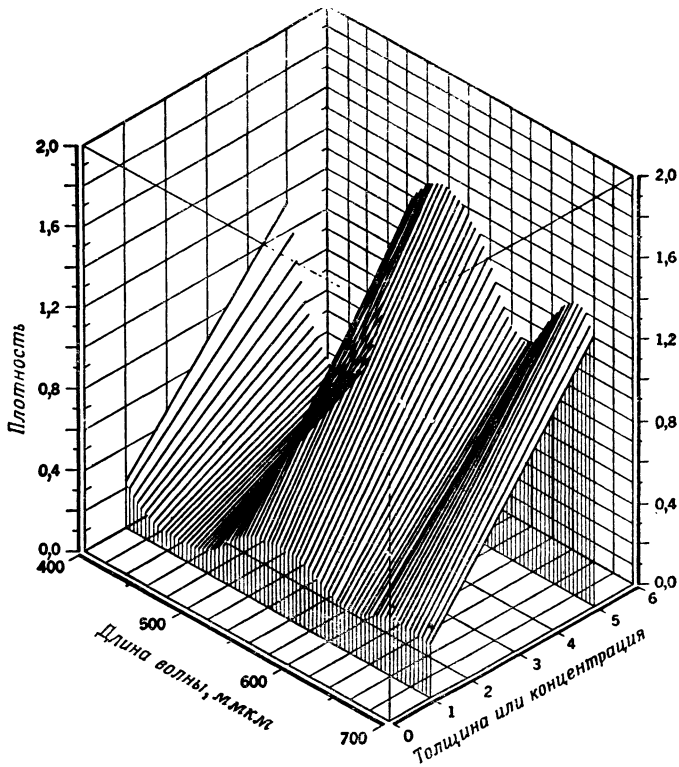
рисунке видна линейная зависимость между плотностью и толщиной (или концентрацией), а также семейство спектрофотометрических характеристик красителя.

Спектрофотометрические кривые, построенные различными описанными выше способами, показаны на фиг. 17.30—17.33, на которых характеристики красителя при трех концентрациях выражены в виде пропускания (фиг. 17.30), относительной пропущенной энергии источника *С* МКО (фиг. 17.31), логарифма пропущенной энергии (фиг. 17.32) и плотности (фиг. 17.33) для каждой длины волны. Как следует из этих рисунков, кривая плотности, особенно при самой высокой концентрации, дает лучшую картину избирательного действия этого красителя.

Кривые относительной энергии на фиг. 17.31 наиболее наглядны, так как они непосредственно показывают природу света, действующего на глаз. Однако их неудобство заключается в том, что при широком изменении концентрации необходимо использовать различный масштаб.

Существует другой метод построения таких кривых, имеющий много преимуществ, который часто встречается в литературе. Этот метод заключается в умножении или делении каждой из кривых пропускания на определенные постоянные коэффициенты, выбран-

ные таким образом, чтобы значения пропускания при некоторой длине волны были одинаковыми для всех кривых. Эта длина волны может быть выбрана совершенно произвольно с таким расчетом, чтобы облегчить непосредственное сравнение кривых. Две такие

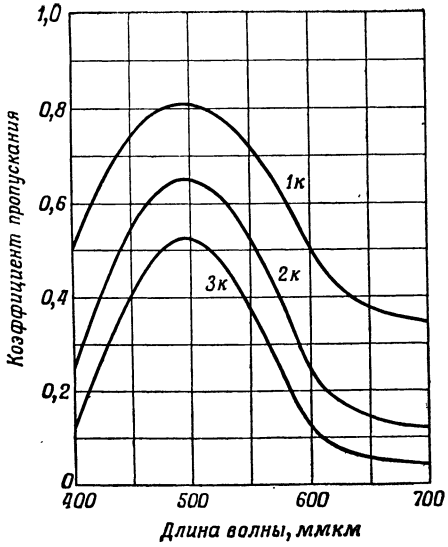


Ф и г. 17.29. Трехмерная диаграмма зависимости между длиной волны, толщиной или концентрацией и плотностью красителя.

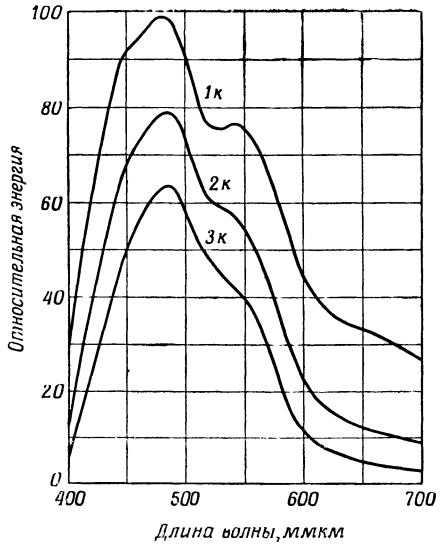
кривые пропускания показаны на фиг. 17.34. Относительные характеристики находят широкое применение, особенно при сравнении источников света.

Примером такого построения может служить фиг. 3.2, на которой излучение абсолютно черного тела при различных температурах нанесено на график так, что относительная энергия всех кривых равна 100% при длине волны 560 *ммкм*.

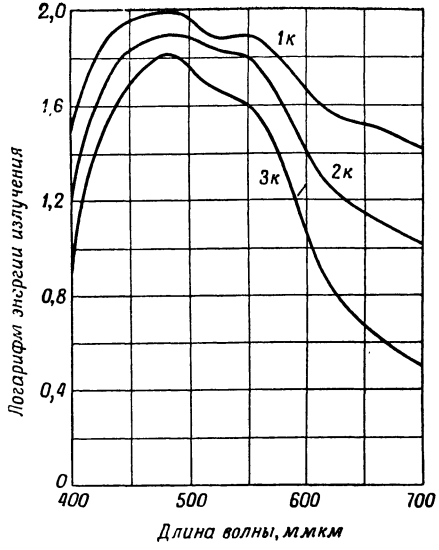
Таким образом, мы рассмотрели много различных способов построения кривых спектрального распределения энергии и спектральных характеристик избирательного поглощения материалов.



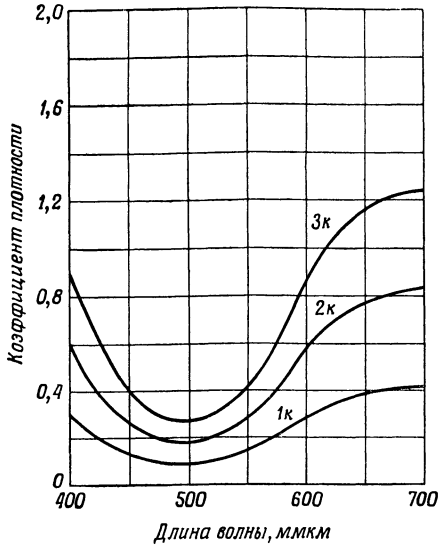
Ф и г. 17.30. Кривые спектрального пропускания красителя, показанного на фиг. 17.27, при трех значениях концентрации.



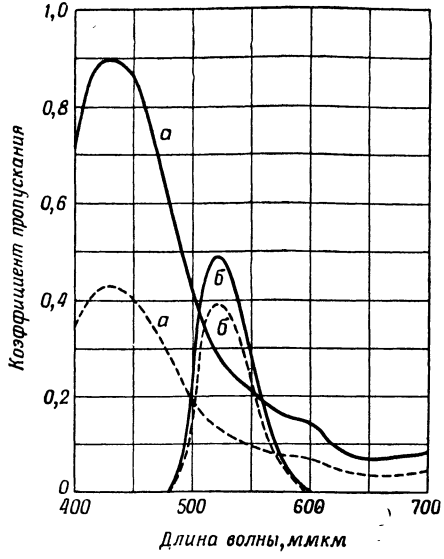
Ф и г. 17.31. Относительное распределение энергии в спектре излучения источника *C* после прохождения через краситель в концентрациях, показанных на фиг. 17.30.



Ф и г. 17.32. Логарифм относительного спектрального распределения энергии, показанного на фиг. 17.31.



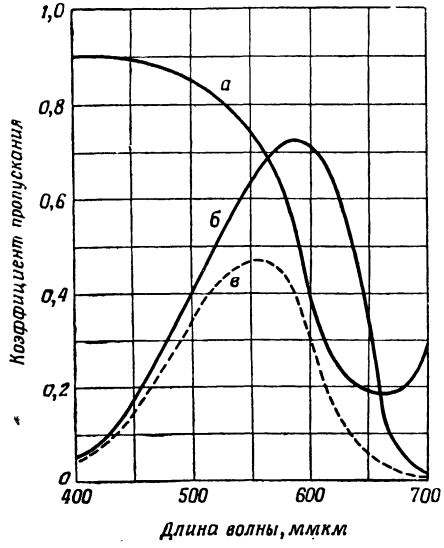
Фиг. 17.33. Плотности красителя, показанного на фиг. 17.30, при трех концентрациях.



Ф и г. 17.34. Кривые спектрального пропускания двух светофильтров.

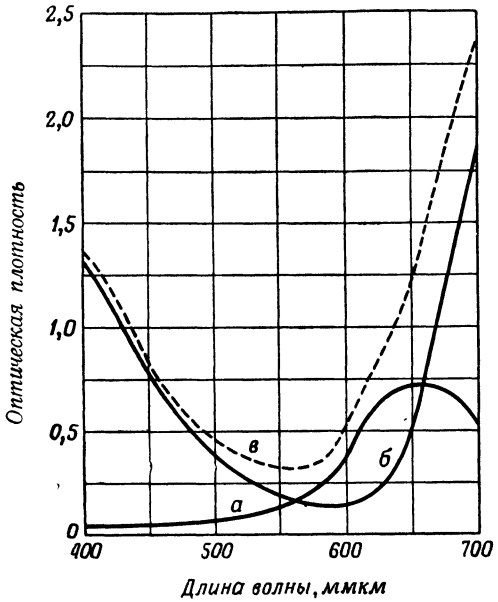
а — для светофильтра Раттен № 78; *б* — для светофильтра № 58А.

Сплошными линиями показаны кривые пропускания, начерченные так, чтобы коэффициент пропускания обоих светофильтров был при длине волны 560 *ммкм* одинаковым; пунктирными линиями показано истинное пропускание.



Ф и г. 17.35. Спектральное пропускание красителей *а* и *б* и их смеси *в*.

Следует, однако, всегда иметь в виду, что независимо от метода построения все кривые соответствуют одним и тем же физическим характеристикам объектов. Кроме того, надо помнить, что глаз определенным образом суммирует абсолютную энергию каждой длины волны, причем его реакция зависит от уровня адаптации. По этой причине подобные кривые фиг. 3.5 и 17.34 более схожи, чем кажется, учитывая возможность регулирования абсолютной



Ф и г. 17.36. Спектральные плотности красителей *а* и *б* (по фиг. 17.35) и их смеси *в*.

интенсивности. Когда две окрашенные среды рассматриваются в условиях, при которых невозможно регулирование интенсивности света, например для отражающих материалов в нормальном окружении, такое изменение масштаба вносит путаницу и лучше использовать кривые процентного пропускания, подобные тем, которые изображены на фиг. 17.30.

Как уже указывалось, метод построения графиков с использованием шкалы плотностей не только позволяет рассматривать больший диапазон на небольшой площади, но дает много других преимуществ. Одним из свойств логарифмов является то, что при перемножении двух чисел логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей. Так, $2 \times 4 = 8$; $\lg 2 = 0{,}3$, $\lg 4 = 0{,}6$ и $\lg 8 = 0{,}9$. Закон Бэра утверждает, что увеличение концентрации эквивалент-

но умножению величин всех пропусканий на самих себя столько раз, во сколько раз увеличена концентрация по сравнению с единичной. Таким образом, суммарная плотность может быть получена путем умножения величины плотности для каждой волны на столько, во сколько раз увеличилась единичная концентрация. Например, предположим, что при данной концентрации и длине волны плотность равна 0,7. Если концентрация удвоилась, удвоились и все плотности, и соответствующая плотность стала равна 1,4. Если концентрация увеличилась на 50%, плотность также увеличилась на половину и стала равной 1,05 и т. п. Другими словами, как уже указывалось ранее, плотность прямо пропорциональна концентрации или толщине. Кривые плотности (для монохроматических излучений) находятся, следовательно, в простой зависимости от концентрации или толщины.

Другое важное свойство обусловлено этой же закономерностью. Если свет пропущен через две или более окрашенные среды, суммарный эффект всех их может быть определен простым сложением плотностей каждой среды при соответствующих длинах волн. В связи с этим тот, кто привык пользоваться кривыми плотностей, легче определит, что произойдет при смешении окрашенных сред, если они представлены кривыми плотностей, а не кривыми пропускания. Кривые пропускания и кривые плотности для одной и той же пары красителей и их субтрактивной смеси показаны на фиг. 17.35 и 17.36. Следует, однако, предупредить читателей, что по результирующей кривой плотности более трудно представить себе наблюдаемый цвет, чем по кривой пропускания, что осложняет использование этого метода.

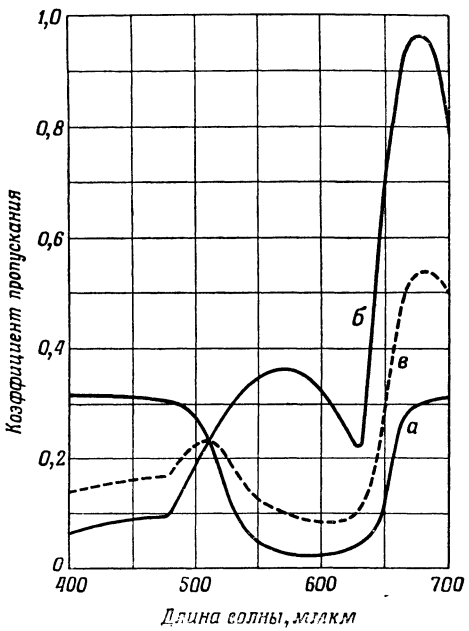
Особенности субтрактивного смешения цветов

В конце этой главы рассматривается субтрактивное смешение окрашенных сред и выражение результатов этих смесей колориметрическими методами. Как и ранее, здесь будет использован цветовой график МКО.

Как было показано выше, поглощение красителей может быть изображено или в виде кривых пропускания, или в виде кривых плотности. Свет, прошедший через две или более окрашенные среды, которые действуют одновременно или последовательно, в физическом смысле можно считать частью излучения источника света, оставшейся после того, как каждая окрашенная среда произвела вычитание части энергии, характерной для ее кривой поглощения. Каким бы способом ни рассматривалась проблема, существенно важно постоянно иметь в виду, что между цветом образовавшейся смеси и цветами самих окрашенных составляющих прямой связи не существует. Это положение ранее уже подчеркивалось, но представляет интерес проиллюстрировать его на конкретных примерах.

Кривые пропускания *а* и *б* на фиг. 17.37 представляют собой расчетные спектрофотометрические характеристики двух растворов красителей в концентрации, которая может быть произвольно принята как единичная.

При этой концентрации и источнике света *С* цветности голубого и желтого красителей будут дополнительными друг к другу; так что, если излучение, пропущенное красителем *а*, смешать с излучением, пропущенным красителем *б*, при постоянной интенсивности источника *С*, результирующее излучение опять будет соответствовать по цветности источнику *С*.



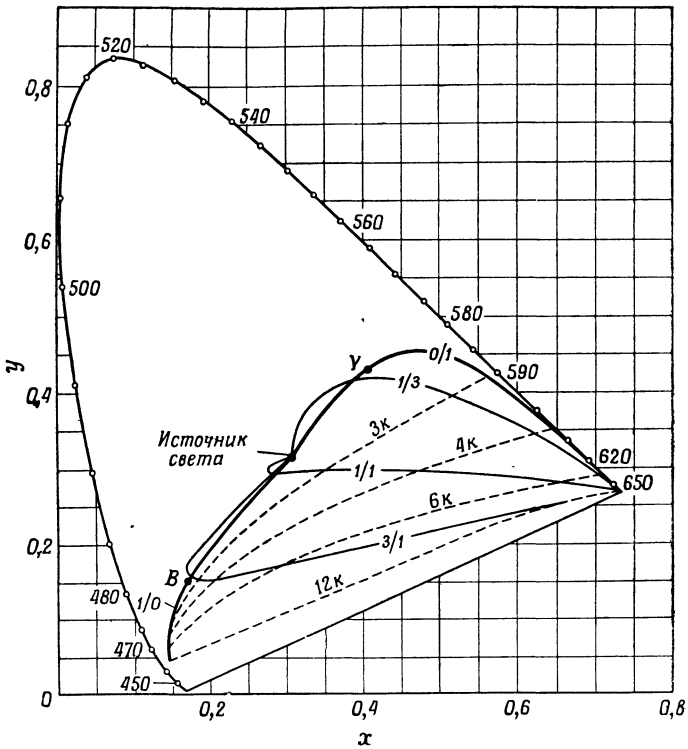
Ф и г. 17.37. Кривые спектрального пропускания для голубого (*а*) и желтого (*б*) красителей в единичных концентрациях, которые, будучи освещены источником *С*, образуют излучения с дополнительными цветностями.

Пунктирная кривая соответствует пропусканию смеси красителей в соотношении 1 : 1 также при единичной концентрации.

В связи с этим может показаться логичным предположить, что смесь голубого и желтого красителей в отношении 1 : 1 при различных концентрациях также даст ряд нейтральных по цвету растворов, отличающихся только по плотности. Что дело обстоит не так, можно показать графически (фиг. 17.38). На этом графике сплошными кривыми, исходящими из точки, соответствующей цветности источника света, изображены линии цветностей голубого и желтого красителей при переменной концентрации. Эти линии одинаковы по природе с «рядами закона Бэра», показанными на фиг. 17.8. Точки *В* и *Y* на этих линиях представляют цветности, соответствующие единичным концентрациям красителей.

Смешав равные объемы обоих красителей при единичной концентрации, получим раствор, в котором соотношение красителей будет 1 : 1. Кривая *1/1* представляет собой линию цветности различных концентраций этого раствора, в котором поддерживается постоянное соотношение объемов красителей при переменной концентрации. Если бы смесь двух красителей в соотношении 1 : 1 давала при любой

концентрации нейтральные цвета, все точки этой кривой на цветовом графике МКО совпали бы с точкой, соответствующей цвету источника света. Однако, как следует из фиг. 17.38, смесь красителей в соотношении 1 : 1 не дает нейтрального цвета; цветность смеси



Ф и г. 17.38. Линии цветности голубого и желтого красителей при различных концентрациях как для отдельных красителей (жирные сплошные линии), так и для их смеси в различных соотношениях (тонкие сплошные линии).

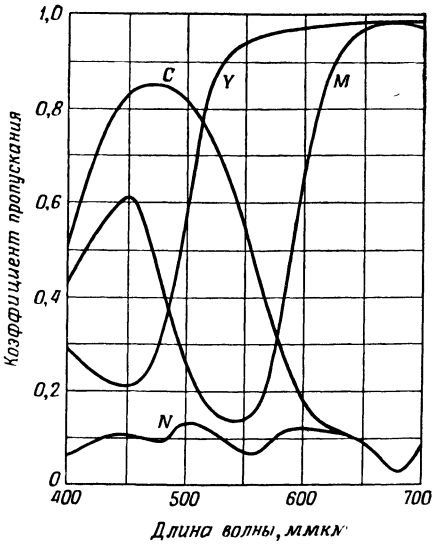
Пунктирными линиями показаны траектории цветности при постоянной общей концентрации красителей и различных соотношениях этих красителей в смеси. Дробными цифрами на линиях указаны величины отношений количества голубого красителя к желтому.

изменяется от цветности источника *C* через сине-зеленый, синий и пурпурный до темно-красного по мере того, как концентрация изменяется от нуля до ее предельного значения, которое в данном случае составляет 12 единиц концентрации.

При низких концентрациях и сильно отличающихся соотношениях объемов красителей действие красителя, содержащегося в

меньшем количестве, может быть небольшим и цвет смеси может быть близким к цвету преобладающего красителя. При высокой концентрации красителей смесь приобретает цветность, сильно отличающуюся от цветности каждого красителя. Эти свойства смесей красителей показаны на фиг. 17.38 линиями цветности для различных концентраций смеси желтого и синего красителей при соотношении красителей 3 : 1 и 1 : 3.

Если для двух красителей построено достаточное количество линий цветности различной концентрации при постоянном соотношении красителей в пределах каждой линии, можно, соединив точки цветности с одинаковой концентрацией, получить плавную кривую, представляющую собой линию цветностей двух красителей при постоянной концентрации, но изменяющемся соотношении объемов красителей. На фиг. 17.38 пунктиром показаны такие кривые для четырех различных концентраций.



Ф и г. 17.39. Кривые пропускания типичной триады красителей, используемых в современной цветной фотографии.

Таким образом, цветовой график позволяет проследить влияние на цветность изменений концентрации смешиваемых красителей и состава смеси.

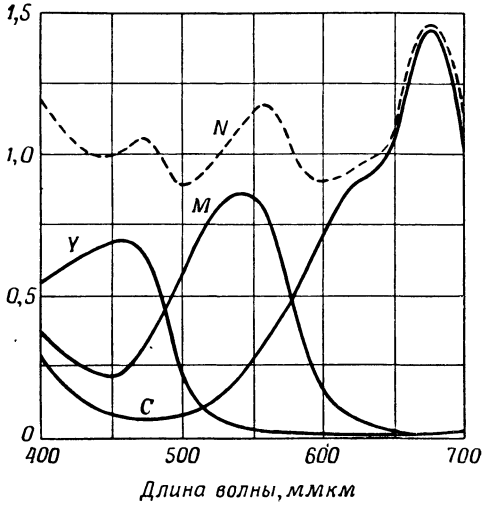
Хотя линии постоянной концентрации и постоянного соотношения красителей редко бывают прямыми, однако кривизна их обычно мала, что позволяет при достаточном числе линий использовать линейную интерполяцию между ними с приемлемой точностью. График такого типа позволяет просто определить всю гамму цветностей, которые могут быть получены смешением двух красителей в любой пропорции и в любой концентрации, и определить также, по крайней мере теоретически, концентрацию и состав смеси красителей, необходимые для воспроизведения определенной цветности.

Только что рассмотренные синий и желтый красители являются гипотетическими, и смешение их, изображенное на цветовом графике МКО в виде сетки, было подсчитано математически.

Рассматривая смеси реальных красителей, можно также определять сетки на цветовом графике МКО путем прямых

спектрофотометрических измерений при различных концентрациях и соотношениях смешиваемых красителей. Следует иметь в виду, что при работе с реальными окрашенными средами предельные концентрации, которые были использованы при расчетах, встречаются редко.

Большинство красителей имеет высокую степень пропускания в области длинных волн, и красный цвет является обычным цветом, получаемым в смесях красителей с высокой концентрацией. Обычно красители имеют один или в лучшем случае два максимума (пика) поглощения в спектре и кривая пропускания снижается плавно в обоих направлениях. Тем не менее кривая, представляющая на цветовом графике линию цветности смеси двух красителей, обычно далека от прямой, соединяющей точки графика, соответствующие двум смешиваемым красителям.



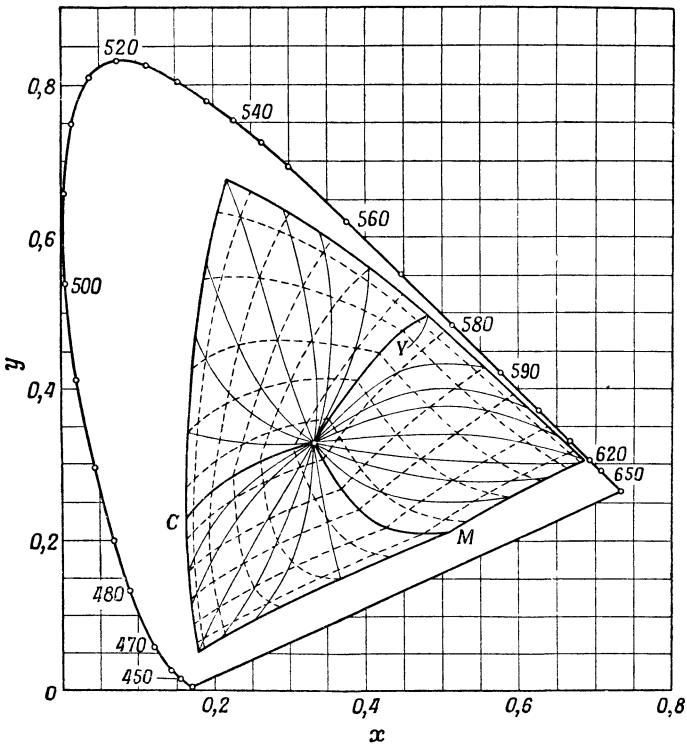
Фиг. 17.40. Кривые плотности для красителей, кривые пропускания которых показаны на фиг. 17.39.

Применение цветовой сетки никоим образом не ограничивается смесями двух красителей, оно может быть легко распространено и на смеси многих красителей. В цветной фотографии обычно используются смеси трех красителей. Добавление еще одного красителя значительно расширяет ряд цветностей, получаемых при данном источнике света.

На фиг. 17.41 показана сетка смешения для трех красителей, приведенных на фиг. 17.39. Плотности этих красителей показаны на фиг. 17.40. Это обычное сочетание трех красителей, которые в соответствующих пропорциях образуют серый цвет и позволяют получить все основные цветовые тона достаточной чистоты. До сих пор были рассмотрены только цветности смесей. В некоторых практических случаях не меньшее значение имеет абсолютное пропускание света смесью, которое определяет воспринимаемую глазом яркость. При увеличении концентрации красителя коэффициент пропускания значительно уменьшается. На фиг. 17.42, например, показана кривая логарифма коэффициента пропускания смесями краси-

телей (кривая *1/1* фиг. 17.38). Эту кривую можно считать типичной для всех линий сетки, изображенной на фиг. 17.38.

В то время как область возможных цветностей трех красителей охватывает большую часть цветового графика, в действительности при нормальных условиях наблюдения многие области цветности

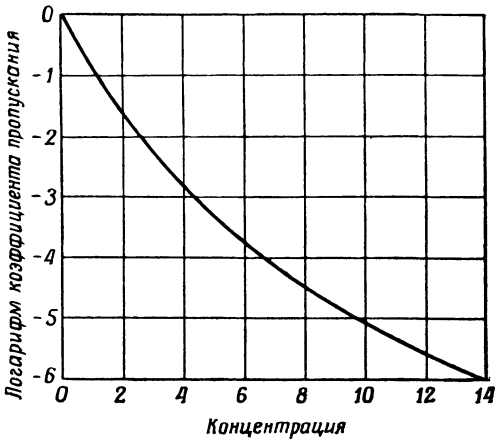


Ф и г. 17.41. Сетка смешения для трех красителей, рассчитанная по данным фиг. 17.39.

Сплошными линиями изображены цветности при постоянном соотношении двух красителей и различных их концентрациях; пунктирными линиями изображены цветности при постоянном количестве одного красителя и меняющемся количестве другого.

воспроизводятся при столь малом коэффициенте пропускания, что кажутся практически черными. Многие из линий цветности, показанных ранее на фиг. 17.9—17.24, при больших концентрациях также кажутся черными. Такие результаты приводят к более или менее обоснованному обобщению, что, в то время как теоретически линии цветности единичного красителя или смеси красителей могут иметь почти любое направление на цветовом графике, области

реальных цветностей, которые наблюдались бы из этих рядов, были бы значительно темнее как цвета, подвергшиеся дополнительным преобразованиям.



Ф и г. 17.42. Логарифм пропускания света смеси синего и желтого красителей, линии цветности которых показаны на фиг. 17.38, при соотношении количеств красителей 1 : 1 и меняющейся концентрации.

Практические ограничения

В то время как теоретических ограничений в результатах смесей красителей очень мало, практические ограничения очень многочисленны и серьезны. Если смешаны красители при больших концентрациях, единственным ожидаемым или неожидаемым результатом будет темно-коричневый или черный цвет, если только не повысить яркость источника настолько, чтобы сделать пропущенный свет видимым глазу при его нормальном уровне адаптации. Однако неудивительно, что художнику и колористу на текстильных предприятиях «законы» смешения цветов кажутся проще, чем они есть на самом деле. Смесь, которая дает непредвиденный или необычный результат, просто отбрасывается, и ищутся более приемлемые смеси. В результате вопрос кажется весьма простым. Эта кажущаяся простота привела к бесконечным и бесплодным спорам в течение более чем полувека насчет так называемых правильных основных цветов для той или иной цели.

Уже в первой работе Юнга и Гельмгольца над законами аддитивного смешения цветов было показано, что максимальное ко-

личество цветов, получаемых аддитивным смешением, может быть создано красным, зеленым и синим излучениями. Попытки применить эти законы к субтрактивным смесям привели к выводу о кажущемся несоответствии теории и практики. При субтрактивном смешении цветов в отличие от аддитивного максимальный цветовой охват получается путем смешения голубого, пурпурного и желтого красителей. Из-за путаницы в терминологии голубоватый сине-зеленый цвет зачастую называют «синим» и красновато-пурпурный — «красным». В действительности, как мы пытались показать в этой книге, нет ни малейшей причины для споров. Законы аддитивного и субтрактивного смешения цветов совершенно различны. Когда художник смешивает синюю и желтую краски, чтобы получить зеленую, он совершает операцию, совершенно отличную от той, которую совершает ученый, получающий желтый цвет, аддитивно смешивая световые потоки красного и зеленого излучений. В этом отношении и художник, и ученый действуют отлично от физиолога, который, окружая серый цвет зеленым, заставляет нас видеть вместо серого цвета пурпурный. Основная причина того, что эффект, получаемый физиологом, не приводит к заблуждениям, состоит в том, что в этом случае мы не говорим о смешении, хотя в действительности эффект цветового контраста также можно рассматривать как смесь ощущений, вызванных цветовой адаптацией.

Основные цвета и цветовые круги

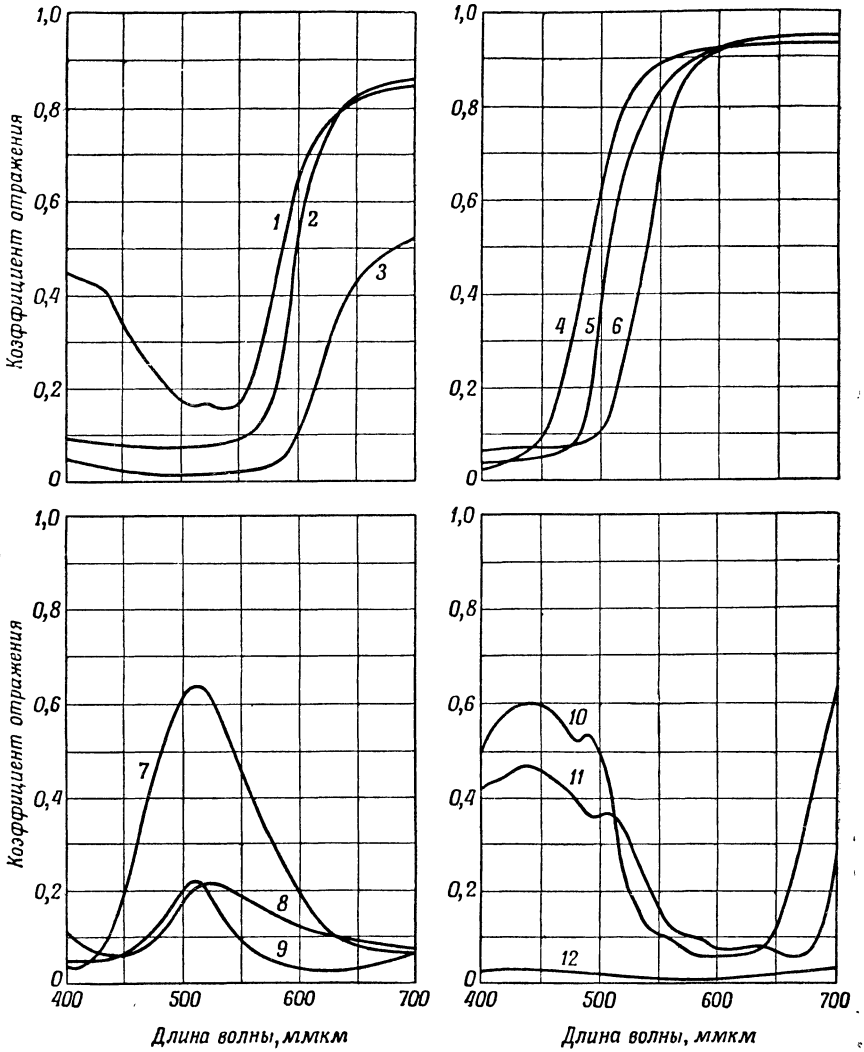
Говоря об «основных цветах», художник использует это слово совсем не в том смысле, в каком использует его физик, когда последний говорит об аддитивном смешении. Это не значит, однако, что понятия, с которыми работает художник, менее обоснованны или менее важны. Не следует совершать ошибки, применяя к этим понятиям законы, которые были установлены для другого вида смешения цветов. Художник обычно располагает цвета по цветовому кругу. Он считает, что цветовые тона располагаются в этом круге более или менее равномерно. Художник замечает, что насыщенность и светлота при изменении цветового тона изменяются, но он считает это свойством самих красок, а не пороком его системы. Синий —прирожденно темный цвет, желтый — очень светлый, а красные и зеленые краски имеют промежуточные значения яркости. Природные цвета и цвета спектра не опровергают этих представлений, и если насыщенность цвета воспроизводимого объекта больше насыщенности его палитры, художник думает об этом, как о недостатке красок, находящихся в его распоряжении, и тоскует по «совершенной палитре», которая позволила бы ему охватить все великолепие видимого им объекта. С этой точки зрения он последователен и практичен. Ограниченность цветовой системы Оствальда не кажется

ему недостатком. Расположение цветов по цветовому кругу кажется художнику наиболее ясной системой цветов. Он должен расположить палитру по кругу, тогда синий цвет соединится с красным через пурпурный, чтобы замкнуть окружность. Художник также стоит перед проблемой дополнительных цветов. Так как его практическому глазу эти цвета кажутся наиболее противоположными или контрастными, то логично, что они должны быть расположены на противоположных радиусах круга. При этом необходимо несколько отступить от принципа равномерного расположения цветовых тонов.

Построением такого цветового круга завершается вопрос о классификации красок по цветности. Теперь художник должен оттенить цвета — в одном направлении до серого или до черного и в другом до белого. Первое дает ему ряды яркостей, а второе — ряды насыщенности, так же как в системе Оствальда, причем художник видит в таком построении многообещающую гармонию. «Тормоз», если можно так его назвать, проявляется в том, что для рядов, использующих данные пигменты, художник не находи простых правил образования цветовых смесей. Как видно было из предыдущей главы, смесь черного с белым может в некоторых случаях образовать синий или, возможно, желтый цвет; при добавлении белого к синему увеличивается насыщенность последнего; смесь голубого с желтым может дать различные ряды зеленого и т. п. Все эти эффекты являются специфическими свойствами конкретных красителей, которые художник привык употреблять. Чтобы работать с этими красками, художнику необходимо изучить своеобразие процесса их смешивания. Квалифицированный художник, однако, является мастером своего дела и получает желаемый результат с весьма завидной легкостью. Однако необходимо выяснить, что́ он действительно делает.

Прежде всего очевидно, что художник обязательно должен балансировать для конкретной смеси ряды, которым следуют используемые им краски. Особенно важно, чтобы художник имел некоторую определенную цель, заранее наметил цвет, который он хочет получить. Эти цели могут основываться на цветовом круге, который художник представляет себе, или быть связанными с предметом, на который он смотрит, но во всяком случае они являются психологическими по своей природе. Художник пытается получить на бумаге или на полотне конкретный цвет, который он «видит» своим мысленным взором. Чтобы найти цвет, наиболее приближающийся к натуре, он следует некоторым приближенным эмпирическим правилам.

Рассмотрим вкратце происхождение этих эмпирических правил.



Ф и г. 17.43. Кривые спектрального отражения 12 обычных пигментов, используемых художниками.

1 — крапп-лак; *2* — английская красная; *3* — ализарин малиновый; *4* — цинковая желтая; *5* — хром желтый средний; *6* — кадмий желтый средний; *7* — изумрудная зеленая; *8* — хром зеленый средний; *9* — зеленая; *10* — кобальт; *11* — лазурь; *12* — прусская синяя. [Barnes N. F., *J. of the Opt. Soc. of America*, **29**, 208—214 (1939).

Смеси обычных красок

Большинство обычных красителей характеризуется довольно широкими, постепенно падающими спектральными кривыми отражения или пропускания. К тому же обычно эти кривые имеют только один или самое большее два максимума. На фиг. 17.43 приведены кривые отражательной способности для 12 обычных масляных красок, которыми пользуются художники. У таких красок, как акварельные, эти кривые иногда бывают более крутыми.

Художники, как правило, работают с хорошо известными им постоянными наборами красок. Смеси таких красок в первом приближении можно вполне надежно предсказать. Ясно, что смесь голубого и желтого неизбежно дает зеленый. Какой именно зеленый, нельзя предсказать, но это будет зеленый цвет. Если голубой приближается к синему, в общем случае смесь будет иметь зеленый цвет с голубым оттенком. Если желтый приближается к оранжевому, смесь будет иметь зеленый цвет с желтым оттенком и т. п. Другими словами, при использовании реальных красок с широкими областями спектрального поглощения цвета смесей можно приблизительно предсказать по цветам компонентов.

Если попытаться связать эти правила в точную систему, то выяснится, что при работе с одним набором «основных красок» действуют одни правила, а при работе с другим комплектом — другие, отличные от первых. Так, одна пара голубой и желтой красок дает хороший зеленый цвет, а другой очень похожий комплект красок дает чрезвычайно плохой зеленый и т. п. Все краски следуют простым правилам субтрактивного смешения, но предсказать цвет смеси по видимому цвету рассматриваемых красок невозможно.

ГЛАВА XVIII

Краски и пигменты

В предыдущей главе были рассмотрены результаты смешения двух или более прозрачных цветных материалов. Было показано, что, хотя наблюдаемые цвета составляющих еще не дают представления о цвете их смеси, результаты смешения можно предсказать по спектрофотометрическим кривым смешиваемых материалов. При попытке распространить эти закономерности на непрозрачные материалы легко обнаруживается, что простые законы смешения к ним не применимы. В общем случае точный предварительный расчет результата для смеси непрозрачных материалов невозможен. В то же время наиболее часто используются красители именно этого типа. К нему относятся все имеющиеся в продаже краски и огромное большинство художественных материалов. Акварельные краски и цветные лаки обычно достаточно прозрачны и позволяют проводить довольно точные расчеты. Краски, используемые в малярных работах для окраски стен и пола, специально предназначены для того, чтобы скрыть поверхность, на которую они нанесены. Темпера и пастель, которыми пользуются художники, не прозрачны по своей природе. Масляные краски весьма различны по прозрачности, их свойства широко изменяются от прозрачных до непрозрачных, но большей частью они совершенно непрозрачны, за исключением очень тонких слоев.

Непрозрачные смеси

Когда краски предназначены для того, чтобы скрыть поверхность, на которую они наносятся, а не только изменить ее *избирательное* поглощение, мы имеем дело с веществами, не точно подчиняющимися законам, изложенным в предыдущей главе. Хотя принципы, которые мы сейчас рассмотрим, нетрудно понять, в этой главе они будут изложены довольно подробно. Однако вопрос настолько сложен, что точный расчет вообще невозможен. Всякий раз, когда необходимо точно воспроизвести определенный цвет, ничто не может заменить большого навыка в работе по смешению конкретных используемых красок. Каждый художник должен знать, какой результат он получит, смешивая две краски какого-то конкретного сорта, который он использует; те же

самые пигменты, изготовленные другими предприятиями, могут дать совершенно отличные результаты.

Следовательно, все такие смеси надо получать опытным путем, добавляя в небольших количествах то ту, то другую краску до тех пор, пока не будет получен желаемый цвет. По этой причине художник работает по некоторой схеме, благодаря которой он получает определенный результат, а не использует заранее известные пропорции цветов, необходимые для получения этого результата. При этом художнику необходимо знание некоторых более или менее общих соображений, которые помогают ему быстрее достичь своей цели. Мы подробно остановимся на этих общих принципах, не пытаясь вникнуть в вопросы подсчета результатов таких смешений.

Краска

Обзор красочных смесей мы начнем с более или менее детального рассмотрения оптических свойств отдельной краски в зависимости от ее состава.

Обычно краска состоит из твердого вещества, содержащегося в виде мелких частиц в некоторой прозрачной среде, например в олифе, к которой добавляются также другие связующие вещества, чтобы придать краске определенные физические свойства. Поскольку дело идет о цвете и свойствах цветовых смесей, необходимо принимать во внимание только два основных типа материалов: твердые частицы и жидкости. Возможны три основных варианта структуры краски, определяющие ее цвет: 1) цветные прозрачные частицы; 2) цветные непрозрачные частицы; 3) бесцветные частицы, непрозрачные в окрашенной жидкости.

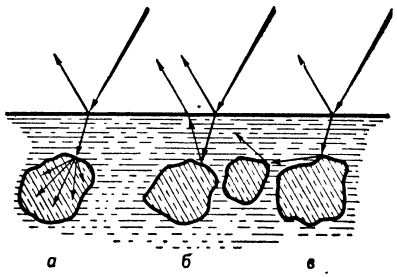
Возможны различные комбинации этих вариантов, а также четвертый случай, когда размер частиц настолько мал, что они становятся коллоидными и рассеивают свет избирательно. Такие материалы кажутся прозрачными; свойства их были изложены в гл. VI при рассмотрении вопроса физики цвета. Рассматриваемые здесь частицы несколько бóльших размеров по сравнению с коллоидными, и их легко можно видеть под микроскопом.

В красках используются два основных вида непрозрачных частиц. Первый из них назван пигментами (хотя этот термин используется и для прозрачных частиц), а второй — лаками. Лаки состоят из непрозрачного вещества, обычно белого, но иногда и окрашенного, обладающего свойством адсорбировать на своей поверхности окрашенные вещества, такие, как красители или коллоидные пигменты, которые сами часто тоже прозрачны. Таким образом, поверхность исходного материала становится избирательно отражающей, однако свойства краски в целом связаны с непрозрачным веществом. Поскольку речь идет о цвете, то не имеет большого зна-

чения, обусловлено ли избирательное отражение адсорбированным веществом или же сами непрозрачные частицы избирательно отражают свет.

Отражательная способность на границе двух сред (в данном случае связующее и пигмент) зависит от относительного показателя преломления этих сред. Эта зависимость была показана ранее на примере фильтров Христиансена. Если нет разницы в показателях преломления, то не будет и отражения на границе двух сред.

Такое поверхностное отражение от частицы всегда является неизбирательным, и только тот свет, который проходит через пограничный слой частицы и возвращается обратно, испытывает избирательное поглощение. Если между связующим и наружной поверхностью твердой частицы имеется большое различие в показателях преломления, то неизбирательное отражение от этой границы будет относительно велико. Часть света, входящего в частицу, будет избирательно отражена обратно, приобретая определенную окраску. Увеличение отношения показателей преломления этих двух материалов уменьшит, следовательно, степень окраски. Показатели преломления некоторых жидких смесей, используемых в красках, при высыхании обычно увеличиваются. Так как для частиц показатель преломления почти всегда выше, чем для связующего, при высыхании избирательное действие обычно увеличивается и цвет становится более насыщенным, хотя обычно этот эффект компенсируется одновременным изменением отражения с наружной поверхности краски, действующим в обратном направлении.

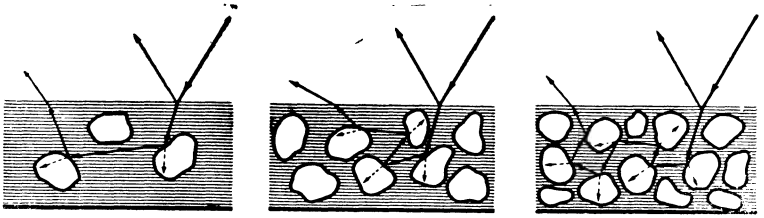


Ф и г. 18.1 Различные случаи влияния частиц пигмента на прохождение света через слой краски.

Для акварельных красок независимо от того, представляют ли они собой коллоидный или истинный раствор, имеет место противоположный процесс; так как показатель преломления воды выше, чем воздуха, то испарение воды увеличивает разность показателей преломления на границе и вызывает уменьшение избирательного действия материала.

Обратная картина имеет место для белой краски, для которой желательно получить максимальное неизбирательное отражение, возрастающее с увеличением разности в показателях преломления, увеличивая тем самым коэффициент отражения. Этот эффект, однако, значительно уменьшается, если частицы большого размера и действительно непрозрачны.

Теперь рассмотрим характерные особенности краски. На фиг. 18.1 показаны в разрезе в увеличенном виде непрозрачные частицы, взвешенные в связующем. Световой поток, входящий в такую смесь через наружную поверхность, наталкивается на непрозрачную частицу и следует дальше одним из трех возможных путей, зависящих от конкретных условий. Он может: 1) войти в частицу и поглотиться в ней (фиг. 18.1, *а*); 2) отразиться по направлению



Фиг. 18.2. Схема, показывающая действие увеличения концентрации пигмента в среде.

к наружной границе краски (фиг. 18.1, *б*) или 3) отразиться по направлению к другой частице, где эти три возможности повторятся (фиг. 18.1, *в*). Которая из последних двух возможностей будет преобладать, зависит, конечно, от размера и количества частиц в единице объема краски. Первой переменной величиной, которую надо рассмотреть, является, следовательно, концентрация частиц в среде.

Попытка проиллюстрировать влияние концентрации схематично показана на фиг. 18.2; здесь видны некоторые возможные пути света в краске при трех концентрациях. С увеличением концентрации (слева направо на фиг. 18.2) расстояние между частицами уменьшается и, следовательно, увеличивается многократное отражение между ними. Так как избирательное действие наблюдается при каждом отражении, общее избирательное поглощение значительно увеличивается, а следовательно, увеличится и насыщенность цвета. Если абсорбционная способность частиц достаточно высока, насыщенность может фактически уменьшиться, так как более высокий процент света будет отражен наружу от частиц, лежащих близко к поверхности. Таким образом, подтверждается изложенное ранее положение о том, что процесс прохождения света в краске столь сложен, что предсказать его результаты без детального знания строения данной конкретной краски очень трудно.

Влияние подложки

Очевидно, что прозрачность подобного слоя будет зависеть от степени, в какой свет способен пройти сквозь ряд частиц и достичь отдаленной поверхности материала, где частицы взвешены. В раз-

бавленных красках, содержащих относительно мало частиц в единице объема, прозрачность будет относительно высокой и довольно большой процент света достигнет удаленной поверхности. То же самое явление будет иметь место, если количество частиц в единице объема такое же, но они меньших размеров. Следовательно, количество прошедшего света зависит от размера частицы, концентрации и толщины слоя. Влияние этого пропускания на цвет краски будет зависеть также и от свойств слоя, на который эта краска нанесена (подложка). Если этот слой черный, он будет поглощать свет, если белый — отражать почти весь дошедший до него свет в красочный слой. Если же слой подложки имеет избирательное поглощение, он отразит излучения одних длин волн больше, чем других. Рассмотрим крайние случаи влияния белой и черной подложек.

При черной подложке свет, достигший наблюдателя, полностью состоит из света, отраженного наружу частицами краски. Чем больше размер частиц, выше их концентрация, поверхностное отражение и больше толщина слоя, тем больше количество отраженного света, воспринимаемого как цвет краски. С другой стороны, если краска нанесена на белую отражающую поверхность, прошедший свет отразится по направлению к наблюдателю и, таким образом, снова пройдет через краску в обратном направлении.

Аналогичные рассуждения приложимы, конечно, и к избирательно отражающей поверхности, за исключением того, что отражение от подложки будет различным для каждой длины волны.

Поучительно рассмотреть пигментную краску, нанесенную сначала на белую, а затем на черную поверхность, и проанализировать действие переменных величин в этих двух случаях. Предположим, что краска нанесена на черную поверхность. С увеличением размера частиц, концентрации, отражательной способности и толщины увеличивается и общий световой поток, отраженный наружу из краски. Толщина слоя краски, при котором не имеет значения, нанесена ли краска на черную или белую поверхность, определяет, кроющую способность краски. Если краска отражает до такой степени, что не имеет значения, нанесена ли она на черную или на белую поверхность, о такой краске можно сказать, что ее кроющая способность равна 100%. Уменьшение этого свойства выражается в степени «проявления» черной или белой подложки.

При белой подложке отраженный свет проходит через слой краски дважды и, следовательно, дважды подвергается многократному отражению, увеличивающему насыщенность цвета. Следовательно, краска обычно кажется более насыщенной, когда она нанесена на белую поверхность, чем когда она нанесена на черную.

Конечно, как на кроющую способность краски, так и на насыщенность цвета оказывает влияние толщина нанесенного слоя краски.

Чем больше толщина слоя краски, тем больше вероятность полного поглощения или отражения и соответственно тем меньше вероятность того, что свет дойдет до подложки. При черной подложке влияние увеличения толщины слоя более или менее сравнимо с влиянием увеличения концентрации или увеличения размера частиц. При белой подложке увеличенная толщина слоя при низкой концентрации может дать значительно более насыщенный цвет, чем увеличенная концентрация, так как при низкой концентрации уменьшается отражение от верхних слоев.

Максимальная кроющая способность достигается, конечно, в том случае, когда пигмент используется без жидкой среды. Если частицы пигмента касаются друг друга и они действительно непрозрачны, то свет отражается только от верхнего наружного слоя частиц пигмента. Пастель, например, при достаточной толщине слоя закрывает поверхность полностью. Низкая насыщенность таких цветов обычно связана с отсутствием многократных внутренних отражений, так что бóльшая часть света отражается исключительно от наружного слоя частиц пигмента. Другими свойствами обладают краски, которые благодаря малым размерам частиц абсолютно прозрачны. Эти краски бесцветны на черной подложке и имеют явно выраженный цвет на белой. Их характеристики были рассмотрены в предыдущей главе.

Прозрачные и непрозрачные частицы

Предположим теперь, что частицы обладают избирательным пропусканием. Примером таких частиц может служить измельченное окрашенное стекло в масляной среде. В этом случае единственной причиной, благодаря которой свет может направиться обратно к наблюдателю, является неизбирательное отражение у наружной поверхности частиц.

Такие краски, очевидно, имели бы очень низкую кроющую способность. Их кроющие свойства возросли бы при увеличении разницы в показателях преломления между частицами и средой, но уменьшились бы по мере роста частиц, так как уменьшилось бы отношение поверхности к объему, который они занимают. Для таких красок влияние поверхности, на которую они нанесены, было бы велико, и в общем случае они заняли бы промежуточное положение между прозрачными растворами, рассмотренными в предыдущей главе, и непрозрачной пастелью, о которой говорилось выше. С увеличением толщины слоя возросла бы насыщенность цвета на белой подложке; изменение толщины слоя краски при нанесении ее на черную подложку оказало бы лишь небольшое влияние.

Перейдем теперь к рассмотрению красок третьего типа, содержащих отражающие частицы в окрашенной среде. Примером может

служить непрозрачный белый пигмент в масляной среде, содержащей растворенный краситель. Количество отраженного света будет тем больше, чем больше разница в показателях преломления и концентрации. Более высокую насыщенность, однако, иногда можно получить за счет белой подложки, а не путем увеличения концентрации, так как в первом случае свет проходит дважды через избирательно поглощающую среду. Фактически толщина слоя может оказывать или не оказывать влияния на цвет, это зависит от степени, в которой непрозрачное вещество позволяет свету пройти через среду дважды. Если такой свет не наблюдается, не будут наблюдаться и изменения насыщенности при изменении толщины слоя как на белой, так и на черной подложках.

Влияние наружной поверхности

Очевидно также, что наружная поверхность красочной среды может играть большую роль в окончательном результате. Рассмотрим, например, краску с весьма глянцевой поверхностью. Как указывалось выше, эта краска даст цвет малой насыщенности независимо от ее избирательных свойств, если она рассматривается в помещении с хорошо освещенными белыми стенами и потолком. С другой стороны, если она рассматривается в условиях освещения отдельным источником света, расположенным таким образом, что никакой свет не отражается непосредственно к наблюдателю, цвет краски будет казаться максимально насыщенным. Краски, которые при высыхании образуют матовую поверхность с диффузным отражением, будут иметь большой процент дополнительного белого света независимо от положения или природы источника света. Часто эти чисто поверхностные эффекты более важны, чем только что рассмотренное влияние толщины слоя и концентрации.

Кроме эффектов, связанных с зеркальным отражением, обычно большое значение имеет многократное внутреннее отражение. Как отмечалось в гл. V, только около $^3/_4$ света, диффузно отраженного от глянцевой поверхности, проходит непосредственно в воздух. Остальная часть отражается от слоя лака обратно в среду и снова достигает поверхности только после многократных отражений в слое. Следовательно, лакирование окрашенной поверхности может значительно изменить избирательное действие этой поверхности. Если первоначально шероховатую поверхность с довольно значительным диффузным отражением поверхностного слоя заменить глянцевой лакированной поверхностью, можно получить неожиданный эффект. Возможно наиболее знакомым примером является темная лужа воды на тротуаре или на мостовой, благодаря которой матовая поверхность стала глянцевой. Не менее значительно, но менее привычно действие глянца на масляные краски и пастель.

Изложенные выше характеристики отдельных красок показывают, что и их смеси не следуют правилам для субтрактивных окрашенных сред, которые были изложены в предыдущей главе. Однако неправильно считать, что цвет смеси совершенно нельзя предсказать. Субтрактивное действие краски определяется ее спектрофотометрической кривой отражения, и *в первом приближении* в смеси краска будет действовать в соответствии с ее спектральными характеристиками. Дело просто в том, что для смесей красок нельзя настолько точно предсказать цвет, как для чисто прозрачных окрашенных сред. В некоторых случаях результат смешения красок может быть очень близок к предполагаемому цвету, а в других более редких случаях — значительно отличаться от него.

Смеси с белым или черным

Простейшим видом смеси, изменяющей цвет, является смесь, полученная добавлением белого или черного к первоначальному насыщенному цвету. Заметим, что здесь мы встречаемся с белым как с окрашенной средой в первый раз.

По определению, белая краска неизбирательно рассеивает и отражает или пропускает падающий свет. Обычно белая краска состоит из большого числа мелких частичек сильно отражающего белого вещества, смешанного с маслом или другим связующим. Чтобы белая краска имела хорошую кроющую способность, концентрация частиц должна быть высокой и сами частицы должны быть абсолютно непрозрачны. Рассмотрим последовательно ряд эффектов, возникающих при добавлении таких частиц к цветной краске. Однако перед тем, как начать подробное рассмотрение этих эффектов, мы должны несколько коснуться вопроса, почему белые или черные краски добавляются к другим краскам. Человек, опытный в смешении красок, возможно, ответил бы, что он хочет сделать краску более белой или более черной, и этот ответ, конечно, в буквальном смысле правильный. Однако в данном случае требуется некоторое уточнение. «Белое» и «черное», как мы видели, термины относительные, и в случае прозрачных окрашенных сред они возникают только при некоторых условиях. Так, если прозрачные окрашенные среды рассматриваются изолированно, т. е. если они являются единственными объектами в поле зрения и всякий другой свет исключен, цвет оценивается по его насыщенности и светлоте, а не по содержанию — белого или черного.

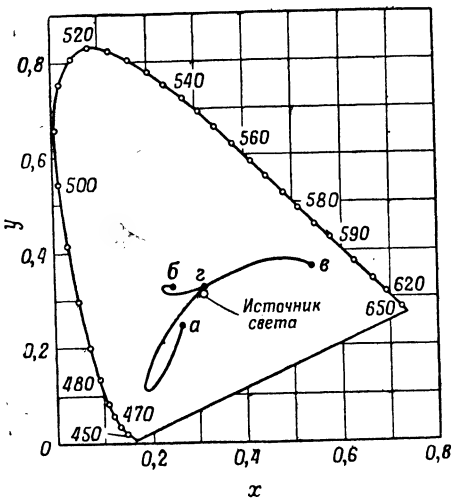
Если те же самые прозрачные окрашенные среды рассматриваются в обычной обстановке, так что они могут сравниваться с белой рассеивающей поверхностью, восприятие сразу же изменится и станут применимы понятия «содержание белого или черного цвета».

Тот, кому приходится смешивать краски, будь то художник или маляр, знает, что черный и белый цвета нейтрализуют (уравновешивают) друг друга, так что, используя обе краски, он может уменьшать насыщенность цветов и в то же время регулировать кажущееся количество добавленного белого. Возможность непосредственного восприятия содержания белого или черного сделала систему Оствальда особенно популярной среди тех, кто имеет дело со смешением пигментов. При воспроизведении натуры художник имеет дело с психологическими переменными цвета, и результаты наблюдения истолковываются им непосредственно в функции цветового тона, насыщенности и светлоты. Однако, чтобы воспроизвести желаемый цвет, художник должен иметь дело с черным и белым как пигментами. Это тем более справедливо, если краска должна иметь хорошие кроющие свойства и, следовательно, восприниматься более или менее независимо от поверхности. Художник-акварелист может достичь желаемой насыщенности цвета, разбавляя краску водой, потому что акварельные красители образуют цвет вычитанием из постоянного белого. Художник, работающий масляными красками, использует белый как переменную величину. Можно утверждать, что и масляными, и акварельными красками может быть получен один и тот же цвет, однако методы получения этого цвета могут быть различными. Поэтому важно рассмотреть эффект, который достигается, когда непрозрачный белый пигмент добавляется к краске, уже обладающей хорошими кроющими свойствами. В этом случае имеют место два физических процесса: краска разбавляется и в слой краски вводятся хорошо отражающие непрозрачные частицы.

Разбавление краски приводит к увеличению расстояний между начальными частицами красок. В случаях применения лака или пигментной краски в прозрачной среде сам по себе этот эффект привел бы к уменьшению насыщенности цвета. В случае краски с окрашенным связующим и белыми частицами при разбавлении связующего уменьшается избирательное действие краски на единицу толщины слоя краски и, следовательно, при разбавлении уменьшается насыщенность краски.

Добавление белого пигмента сохраняет абсолютную концентрацию всех частиц постоянной для краски, достаточно высокой концентрации, но может значительно увеличить концентрацию для красок с низкой концентрацией. Непрозрачность добавленного белого пигмента придает краске хорошие кроющие свойства. Если кроющая способность была и раньше высокой, изменения будут небольшими, однако если кроющая способность краски была невысокой, то добавление белого пигмента может значительно улучшить кроющую способность краски. Такое изменение кроющей способности может само по себе привести к уменьшению насыщенности цвета.

Как общий результат более важен тот факт, что белые частицы вводят неизбирательное отражение по всей глубине краски. Эффект такого рода особенно значителен для верхнего слоя, где он приводит к большому процентному увеличению света, отраженного от поверхностного слоя краски. Этот эффект также действует в направлении уменьшения насыщенности цвета. С другой стороны, присутствие сильно отражающих частиц может увеличить возможность того, что свет, после столкновения с избирательно поглощающими частицами, «повернется назад» и достигнет наблюдателя. Если краска в чистом виде имеет малый коэффициент отражения, то этот эффект может возместить все другие; происходит отчетливое и иногда весьма большое увеличение насыщенности, особенно если исходная краска является кроющей не благодаря непрозрачности своих частиц, а потому что она поглощает почти весь падающий свет.

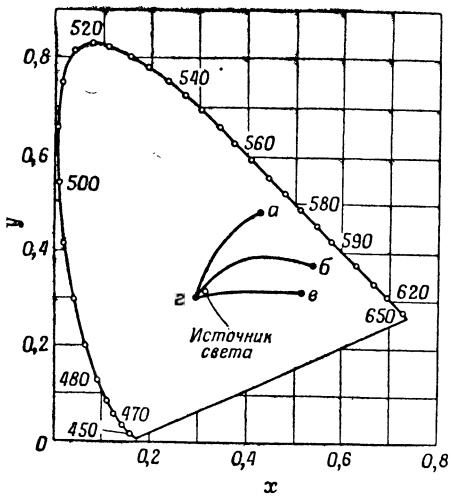


Ф и г. 18.3. Линии цветности смесей пигментов.

а — ультрамарин синий; *б*— зелень; *в* — кадмий оранжевый; *г* — смесь *а*, *б* или *в* с цинковыми белилами в различных пропорциях; насыщенность цвета темных пигментов (зелени и синего) возрастает при добавлении белого пигмента до ее предельного значения, после чего она уменьшается, стремясь в пределе к белому цвету источника света.

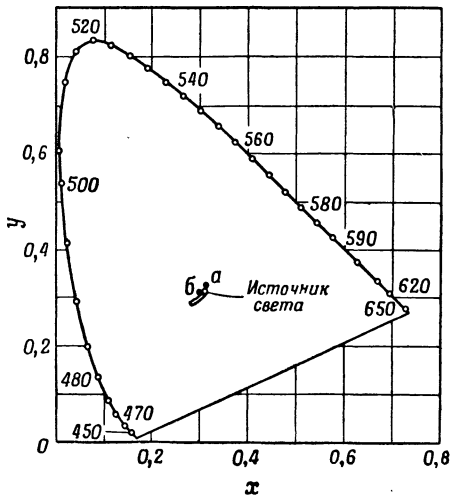
Все эти эффекты иллюстрируются фиг. 18. 3, на которой на цветовом графике МКО показаны и менения цветности при смешении с белым для нескольких масляных красок. Нанесенные на белую бумагу слои были приблизительно одинаковой толщины и получены на образцах, погруженных в суспензию пигмента.

Аналогичные процессы происходят и при добавлении черной краски, за исключением того, что при этом, помимо разбавления и затемнения света, отраженного от нижних слоев, между другими частицами вводятся частицы с высоким неселективным поглощением. Результатом может быть значительное уменьшение насыщенности цвета, так же как и общее потемнение, что связано с относительным увеличением отражения от верхних слоев и уменьшением количества многократно отраженного света, который может покинуть поверхность. На фиг. 18. 4 показаны линии цветности на цветовом графике МКО для ряда таких смесей, полученных описанным выше методом.



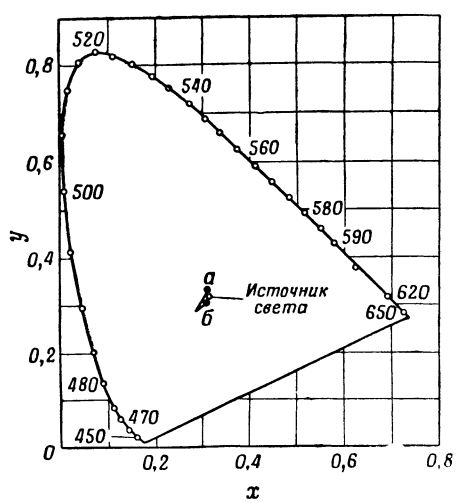
Ф и г. 18.4. Линии цветности для разных смесей.

а — цинковая желтая; *б* — кадмий оранжевый; *в* — кадмий красный; *г* — смесь каждого со слоновой костью (черная) в различных пропорциях. Во всех трех случаях добавления черного насыщенность смеси уменьшается.



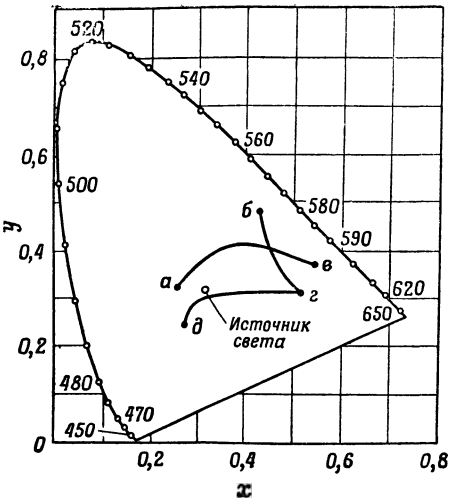
Ф и г. 18.5. Линии цветности для цинковых белил (*а*) и черной краски (ламповая сажа) (*б*), смешанных в различных пропорциях.

При добавлении черного к белому цветность смещается к синей части спектра, а затем возвращается к нейтральному цвету.

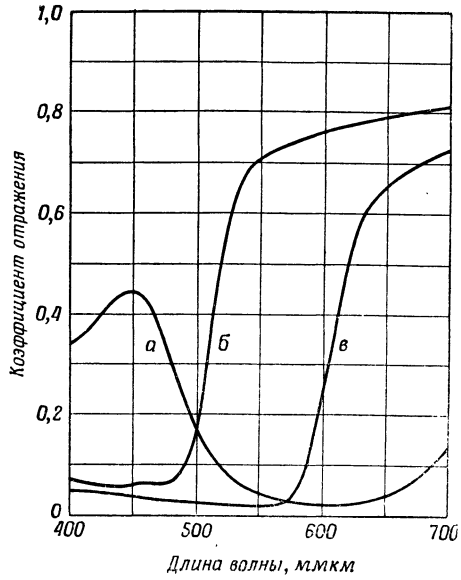


Ф и г. 18.6. Линия цветности для цинковых белил (*а*), смешанных со слоновой черной (*б*).

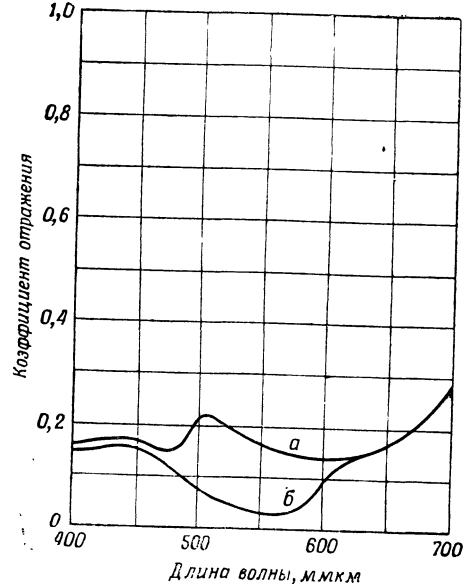
При добавлении черного цветность смещается к синей части спектра, а затем возвращается к нейтральному цвету.



Ф и г. 18.7. Линии цветности для смешанных в различных пропорциях зелени (*а*) с кадмием оранжевым (*в*); цинковой желтой (*б*) с кадмием темно-красным (*г*) и ультрамарина синего (*д*) с кадмием темно-красным (*г*).



Ф и г. 18.8. Кривые спектрального отражения синего (*а*), желтого (*б*) и красного (*в*) пигментов.

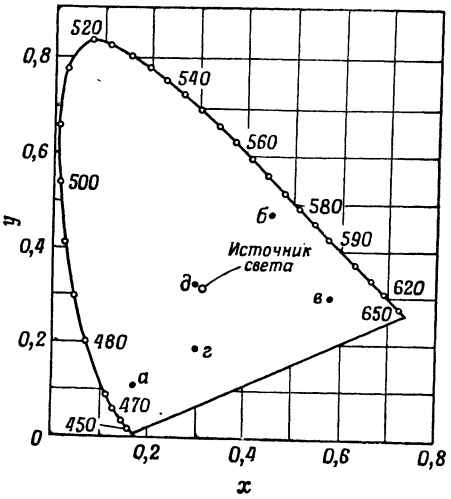


Ф и г. 18.9. Кривые спектрального отражения приблизительно равных количеств смесей синего и желтого пигментов (*а*), показанных на фиг. 18.8, и красного и синего пигментов (*б*).

Весьма интересный процесс имеет место при добавлении белой краски к черной для получения серого цвета. Становятся очевидными два важных свойства белого и черного пигментов. Многие белые пигменты измельчены настолько, что при разбавлении обнаруживают избирательное рассеяние того же самого типа, которое образует синеву неба. При разбавлении хорошим черным иногда удается получить удивительно чистый синий цвет. Это явление фактически и натолкнуло Леонардо да Винчи на мысль, что синева неба является результатом смешения черноты космического пространства с белизной света. Другой эффект обусловлен тем, что многие так называемые черные краски вопреки термину «неизбирательные поглотители» в действительности являются очень темными избирательными поглотителями. При достаточном разбавлении белым пигментом, который увеличивает внутреннее многократное отражение, эта селективность проявляется в виде определенной окраски. Результаты смешения двух групп черных красителей с белым приведены на фиг. 18.5 и 18.6.

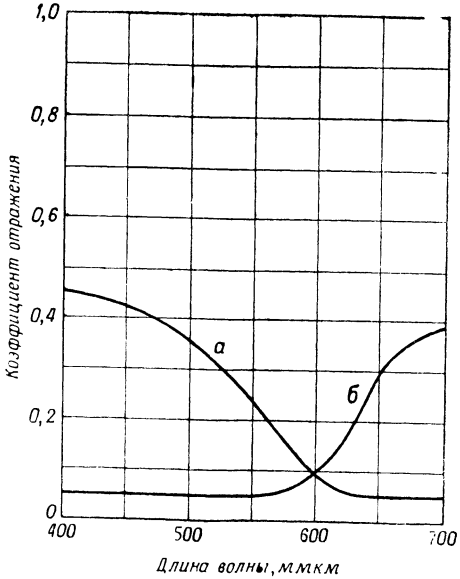
Смеси окрашенных сред

При смешении красок различных цветов с целью получения определенного цвета имеют место столь сложные процессы, что нет смысла пытаться рассмотреть их сколько-нибудь подробно. Очевидно, результаты смешения будут зависеть от спектрального поглощения каждой краски, от структуры краски, определяющей способ поглощения света, от относительной прозрачности двух смешиваемых красок и от природы поверхности, на которую эта смесь нанесена. В некоторых случаях смесь может подчиняться относительно простым законам, установленным для прозрачных окрашенных сред с субтрактивными свойствами; в других — отклонения от этих законов могут быть весьма значительными. Во всяком случае, только сведения, основанные на опыте работы с реальными цветами, дают возможность более или менее точно предсказывать результаты. На фиг. 18.7 показаны цветности ряда смесей художественных масляных красок; кривые, которые были бы получены, если бы краски были прозрачными и подчинялись закону Бэра, несколько отличаются от показанных на рисунке. Представляет некоторый интерес еще один вариант смеси пигментов. Это случай, когда частицы пигмента, сами по себе избирательно поглощающие и непрозрачные, используются в виде *сухих* порошков, перемешанных до равномерного распределения в смеси. Если верхний слой смеси спрессован так, что он стал совершенно гладким, то к наблюдателю попадает свет только от верхнего слоя частиц. При этих условиях свет будет представлять собой аддитивную смесь двух цветов и не будет зависеть от спектрофотометрических кривых отдельных пигментов. Смесь синего и желтого, например, образует голубой или серый, а

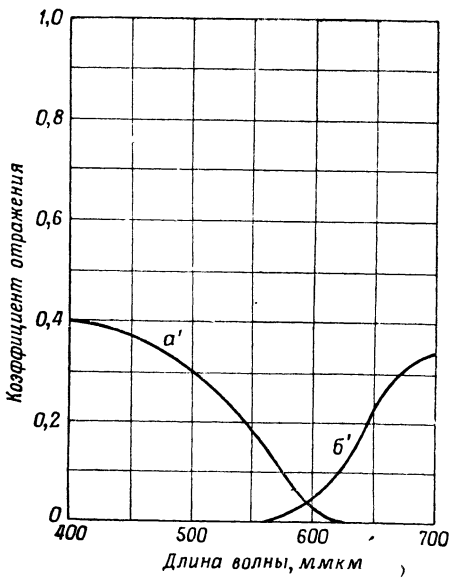


Ф и г. 18.10. Цветности пигментов, показанных на фиг. 18.8 и 18.9.

а, б, в — соответственно цветности синего, желтого и красного пигментов; *г* — цветность смеси красного и синего; *д* — цветность смеси желтого и синего.



Ф и г. 18.11. Кривые спектрального отражения темно-красной (*а*) и синей (*б*) красок (включая отражение от наружной поверхности).

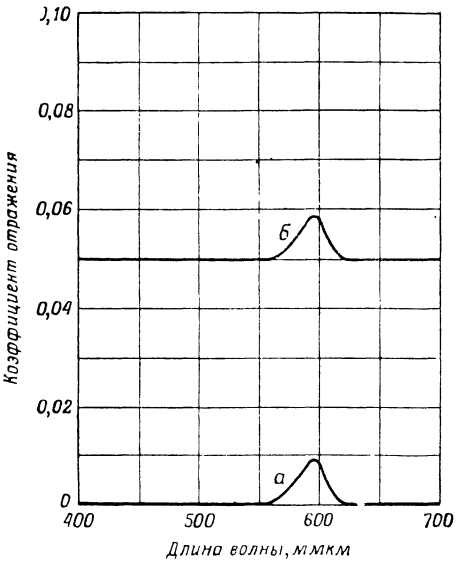


Ф и г. 18.12. Кривые спектрального отражения красок, показанных на фиг. 18.11 (без отражения от наружной поверхности).

не зеленый цвет. Подобный эффект наблюдается, когда пастельные краски смешаны на поверхности путем притирания. Результат иллюстрируется фиг. 18.8—18.10.

Как неоднократно отмечалось, поверхность окрашенной среды играет важную роль в восприятии цвета, который наблюдается при различных условиях. Рассмотрим этот вопрос более подробно для различных красок, так как природа их поверхности в большей степени определяется способом применения.

Краски могут быть составлены так, что они дадут или глянцевую, или матовую поверхность с различной степенью матировки. Кроме того, эта поверхность может быть гладкой или шероховатой, может иметь направленные мазки или быть в виде маленьких пятен неправильной формы, расположенных под различными углами относительно остальной поверхности. Каждый из этих видов поверхности имеет свои характерные особенности и по-своему влияет на цвет, который будет наблюдаться при различных условиях освещения. Однако при всех этих условиях имеет место один эффект — добавление большего или меньшего количества отраженного белого света к окрашенному, отраженному от нижележащих слоев краски.

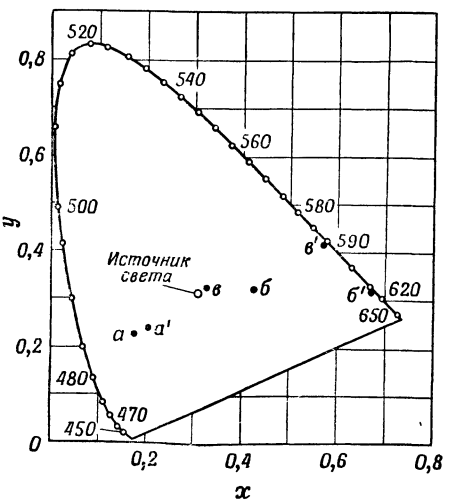


Ф и г. 18.13. Кривые спектрального отражения смеси красок без учета отражения от поверхности (*а*) и с учетом отражения от поверхности (*б*).

Поскольку освещающий свет большей частью белый, добавление его всегда уменьшает насыщенность цвета краски. Степень этого уменьшения при обычных условиях наблюдения редко осознается наблюдателем; это может привести к тому, что цвет смеси будет совершенно отличным от того, какой хотели получить. Явление уменьшения насыщенности было подробно рассмотрено в предыдущей главе в связи с вопросом о рядах концентраций прозрачных окрашенных сред.

В приложении к смесям пигментов это явление может быть кратко рассмотрено на основе спектрофотометрических кривых. Предположим, что две краски при данной концентрации характеризуются

спектральными кривыми отражения (фиг. 18.11). Эти кривые включают в себя отражение белого света каждой поверхностью. Предположим, что коэффициент поверхностного диффузного отражения для каждой краски составляет 5% (эта цифра не является непомерно большой даже для высокоглянцевой поверхности). Спектральное отражение внутренних слоев краски характеризуется кривыми фиг. 18.12, которые получены из кривых фиг. 18.11 простым вычитанием для всех длин волн 5% отражения. Очевидно, что если эти краски смешаны, то основная часть отражения придется на область, где кривые частично совпадают, т. е. приблизительно на длину волны 600 *ммкм*, и что суммарное отражение будет весьма низким. Предполагаемое спектральное отражение смеси показано (без учета отражения поверхностью) кривой *а* на фиг. 18.13. Заметим, что масштаб этой кривой увеличен в 10 раз, чтобы показать более ясно ее форму. На любой длине волны максимальный коэффициент отражения смеси меньше 1%. Внешняя поверхность смеси красок снова будет иметь коэффициент отражения, равный 5% для каждой длины волны, и этот коэффициент отражения добавится к определенному ранее (кривая *б* на фиг. 18.13).



Ф и г. 18.14. Цветность красок, кривые спектрального отражения которых приведены на фиг. 18.11—18.13.

С первого взгляда очевидно, что эта кривая даст цвет очень низкой насыщенности. Степень уменьшения насыщенности показана на фиг. 18.14, на которой даны цветности двух красок с поверхностным отражением (точки *а* и *б*), без поверхностного отражения (точки *а'* и *б'*) и цветности смешанного цвета (точки *в* и *в'*). В то время как сами краски имеют среднее насыщение цвета, смеси имеют высокую насыщенность для света, отраженного глубинными слоями, но она значительно снижается при наличии поверхностного отражения. Таким образом, все темные цвета имеют низкую насыщенность при условии наблюдения, когда поверхностный свет достигает глаза наблюдателя. Однако, если эти цвета освещены таким образом, что поверхностный свет не достигает наблюдателя, их насыщенность может оказаться очень высокой. Этот вопрос мы рассмотрим

подробнее в дальнейшем после краткого рассмотрения зависимостей коэффициентов поверхностных отражений для различных объектов от условий освещения и наблюдения.

Любая неметаллическая глянцевая поверхность неизбирательно отражает часть падающего на нее света. Законы зеркального отражения ясны и вполне понятны. Угол, который отраженный свет составляет с нормалью к поверхности, равен углу падения света, но расположен с противоположной стороны от перпендикуляра, восстановленного к поверхности в точке падения. Процент отраженного света слегка зависит от длины волны, но обычно эта зависимость мала; общий процент отраженного света весьма заметно меняется при изменении угла падения. Для стекла и большинства красочных или подобных им поверхностей коэффициент зеркального отражения составляет 4% для света, который падает на поверхность перпендикулярно, причем этот коэффициент увеличивается сначала медленно, а потом все более и более, приближаясь к 100% по мере того, как направление падающего света все более приближается к направлению, параллельному поверхности.

Если подобная поверхность расположена так, что можно видеть отражение от источника света, то яркость этого отражения будет меняться от минимальной величины, когда свет находится сзади наблюдателя, до яркости, почти равной яркости источника, когда наблюдение ведется с направления зеркального отражения. Изменение коэффициента яркости приводит к тому, что соответственно меняется и количество света, проникающего через поверхность отражения внутрь вещества и претерпевающего там многократные поглощения. Насыщенность наблюдаемого цвета, следовательно, также изменяется в широких пределах. Если отражение источника света или другого предмета не наблюдается непосредственно и наблюдатель видит только свет, отраженный от внутренних слоев краски, то насыщенность при этом максимальная и может несколько изменяться при изменении угла, под которым свет проникает в краску. (Этот эффект может стать весьма значительным, если поверхность *негладкая* и неглянцевая.)

Часто не принимают во внимание то обстоятельство, что глянцевая поверхность почти всегда что-нибудь отражает. В комнате с обычным освещением стены и предметы освещены так, что они ясно видимы. Они обычно полностью окружают наблюдателя, так что при любой ориентации поверхности и любом угле наблюдения видны отражения от наружной окрашенной поверхности довольно высокой яркости. Проанализируем один из крайних случаев. Предположим, что наблюдатель рассматривает ровный слой глянцевой краски в комнате с белыми стенами и потолком, освещенными так же, как и краска. Предположим также, что краска серая с коэффициентом диффузного отражения, равным 5%. Если отражательная

способность белых стен и потолка равна 100%, следовательно, они в 20 раз ярче этой краски. Пусть наблюдатель держит окрашенную поверхность так, что она перпендикулярна к направлению света. Наименьшее значение коэффициента зеркального отражения этой поверхности составит 4%, а суммарный коэффициент отражения будет теперь равен 9%. Если наблюдатель фиксирует окрашенную поверхность под любым другим углом, зеркальное отражение будет еще больше. Для серого цвета эффект будет малозаметным, так как при наложении зеркального отражения меняется только яркость краски, а не ее цветность. Однако если краска цветная и ее *максимальный* коэффициент отражения составляет 5% для любой длины волны, то 4%-ная добавка белого света приведет к значительному уменьшению насыщенности цвета. Однако в большинстве случаев влияние зеркального отражения не столь существенно, в связи с чем глянцевые краски обычно дают цвета самой высокой насыщенности, если только они не отражают непосредственно источник света. Даже для этих красок, однако, редко могут быть созданы условия, необходимые при получении максимальной насыщенности (наблюдение вне угла зеркального отражения от источника при совершенно темном окружении). Если поверхность глянцевая, но неровная, может оказаться невозможным поместить источник света так, чтобы он не отражался зеркально от какой-либо части поверхности. Если эти неравномерности малы по площади, белый свет, отраженный непосредственно от поверхности, может легко составить 30 и 40% падающего света. При этих условиях происходит значительная потеря насыщенности. Предельный случай — шероховатая, но глянцевая поверхность — достигается в «матовой» краске. Для матовой краски неравномерности поверхности столь малы, что их совершенно не видно, и они ориентированы под всевозможными углами. В связи с этим отражательная способность не зависит от углов наблюдения и освещения, и при любых условиях обеспечивается более или менее постоянное высокое поверхностное отражение. В некоторых крайних случаях для поверхностей этого типа возможно поверхностное отражение, достигающее 50%.

Следовательно, во всех случаях белый свет, добавленный при отражении от поверхности, может сильно изменить насыщенность наблюдаемого цвета. В случае глянцевых красок степень разбеливания зависит от условий наблюдения и освещения, но для матовых поверхностей она довольно постоянна и значительна.

Эти соображения не являются чисто академическими и интересными исключительно с точки зрения смешения красок — они имеют жизненно важное значение для всех, кто занимается вопросами освещения или наблюдения окрашенных поверхностей. Возможно, наиболее ясным примером является масляная живопись. Когда художник работает над картиной, он *видит* свои краски с поверх-

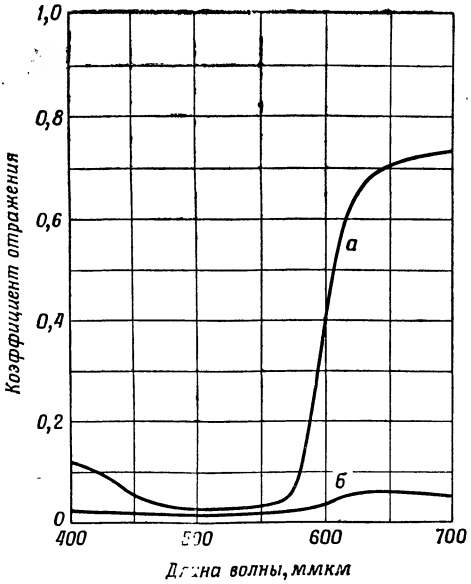
ностными отражениями, определяемыми условиями освещения. Он может изменить насыщенность цветов, меняя *структуру поверхности*, которую он создает кистью, и угол, под которым он наносит мазки. *При любых других условиях это уже будет не та самая картина* и не та, которую художник намеревался написать. Участки с различной фактурой поверхности и угла будут иметь соотношения насыщенности, отличающиеся от тех, которые художник видел, когда рисовал картину, если только вся картина не нарисована ровной и плоской и не покрыта толстым слоем лака. Даже тогда насыщенность всех цветов, и особенно темных, будет меняться, если полотно помещено в комнату, освещенную не так, как студия художника. Те же самые соображения и даже в еще большей степени относятся к живописи, рассматриваемой или фотографируемой в поляризованном свете, т. е. когда устранены поверхностные отражения.

Другие способы смешения цветов

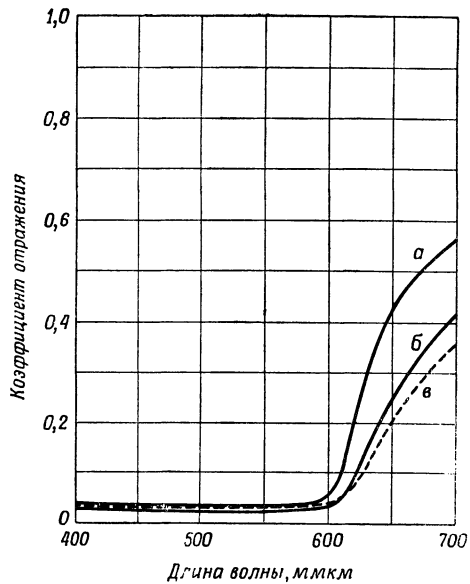
Рассмотрев результаты механического смешения различных окрашенных сред и проследив влияние поверхностного отражения на такие смеси, мы должны рассмотреть теперь ряд других способов комбинирования окрашенных сред. Некоторые из них уже были рассмотрены в предыдущих главах применительно к прозрачным красителям. В дополнение к рассмотренным можно еще указать три случая смесей красок: простое отражение света от одной поверхности к другой, простое наложение двух или более слоев и наложение красок мельчайшими точками.

Первый случай — отражение света последовательно от нескольких поверхностей красочных слоев — тождественен наложению прозрачных слоев. Здесь результат можно предсказать простым подсчетом по спектрофотометрическим кривым; красочные слои в этом отношении не будут отличаться от любого избирательного отражателя.

Третий случай соответствует так называемому пространственному смешению цветов. Как было показано ранее, наложенные рядом маленькие окрашенные площади, которые слишком малы, чтобы их можно было различить глазом, смешиваются аддитивно подобно наложенным световым потокам, спроецированным на белый экран. Часто утверждают, что окрашенные среды, полученные таким способом, имеют более высокую насыщенность. Однако в действительности большинство подобных способов приводит к цветам заметно уменьшенной насыщенности, столь же хорошо воспроизводимым простым смешением. Заметим, что когда площади пятен достаточно велики, чтобы быть различимыми, начинают играть роль другие факторы, которые здесь не рассматриваются (см. гл. VI).

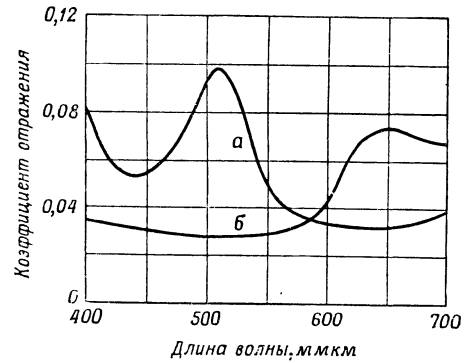


Ф и г. 18.15. Кривые спектрального отражения ализарина малинового, нанесенного на стекло и помещенного поверх белого фона (*а*) и черного фона (*б*).



Ф и г. 18.16. Кривые спектрального отражения ализарина малинового, нанесенного на белую бумагу при различных толщинах.

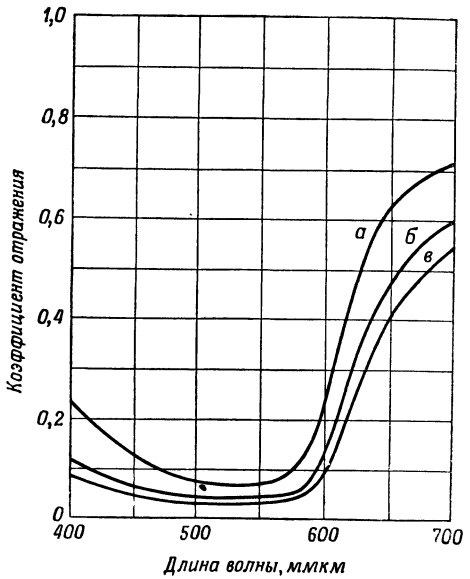
а — одна единица толщины; *б* — две единицы толщины; *в* — три единицы толщины.



Ф и г. 18.17. Кривые спектрального отражения зелени, нанесенной на ализарин малиновый (*а*), и ализарина малинового, нанесенного поверх зелени (*б*).

Второй случай — наложение красочных слоев — требует более подробного рассмотрения. Слой краски благодаря содержащимся в нем частицам отражает свет по направлению к его поверхности, и свет, который мы видим, является смесью световых потоков от различных глубин.

Краски с хорошими кроющими свойствами отражают весь свет, который падает на них, так что цвет такой краски не зависит от поверхности, на которую она нанесена. Если нанесенная краска



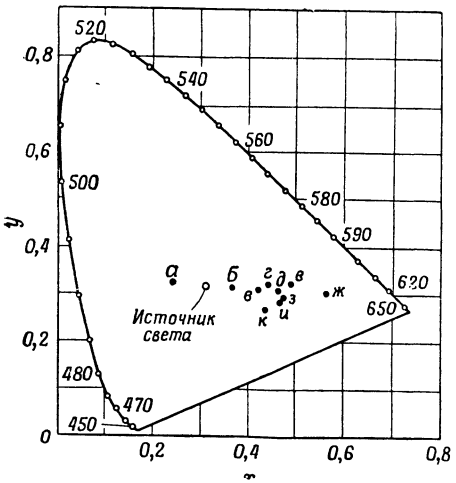
Ф и г. 18.18. Кривые спектрального отражения ализарина малинового, смешанного с цинковыми белилами при следующих отношениях малинового к белому: 1 : 3 (*а*); 2 : 2 (*б*); 3 : 1 (*в*).

прозрачна, то пропущенный свет отразится от слоя, лежащего под ней. В случае полной прозрачности краски видимый цвет ее приближается к цвету, образованному субтрактивным смешением двух окрашенных сред.

На графике фиг. 18.15 показаны спектральные кривые отражения для художественной масляной краски (ализарин темно-красный), нанесенный на стекло средней толщины, помещенное на белой поверхности (*а*) и на черной поверхности (*б*). Кривая отражения на черном фоне соответствует свету, отраженному от поверхности и от внутренних слоев краски. Краска, рассматриваемая на белой

подложке, изменяет свой цвет за счет света, отраженного от подложки и вторично пропущенного слоем.

В этом случае кривая спектрального отражения зависит в основном от поглощательной способности слоя. Наблюдающаяся в этом случае зависимость кривой спектрального отражения от толщины слоя показана на фиг. 18.16.



Ф и г. 18.19. Цветность красок, кривые спектрального отражения которых приведены на фиг. 18.15—18.18.

а — ализарин малиновый поверх зелени (фиг. 18.17, кривая *в*); *б* — зелень поверх ализарина малинового (фиг. 18.17, кривая *а*); *в*— ализарин малиновый (тройная толщина) (фиг.18.16, кривая *в*); *г* — ализарин малиновый поверх черного (фиг. 18.15, кривая *б*); *д* — ализарин малиновый (двойная толщина) (фиг. 18.16, кривая *б*); *е* — ализарин малиновый (в одной толщине) (фиг. 18.16, кривая *а*); *ж*— ализарин малиновый поверх белого (фиг. 18.15, кривая *а*); *з* — ализарин малиновый с белой в соотношении 3:1 (фиг. 18.18, кривая *г*); *и*—ализарин малиновый с белой в соотношении 2 : 2 (фиг. 18.18, кривая *б*); *к* — ализарин малиновый с белой в соотношении 1:3 (фиг. 18.18, кривая *а*).

Следовательно, при изменении толщины красочного слоя цвет света, достигающего нижней поверхности, изменяется больше, чем основной компонент отраженного света, в связи с чем меняется роль нижнего красочного слоя. Из этого факта, а также из того, что пропущенный свет имеет другой спектральный состав, нежели отраженный, вытекают два важных следствия: во-первых, результат наложения двух таких слоев будет различен в зависимости от порядка слоев; во-вторых, верхний слой всегда оказывает большее влияние на окончательный цвет, чем нижний. С другой стороны, при прозрачной верхней краске для увеличения диапазона воспроизводимых цветностей можно использовать тот факт, что пропущенный свет обычно имеет большую насыщенность, чем отраженный. На фиг. 18.17 показано спектральное отражение прозрачной зеленой краски, нанесенной на красную с хорошо отражающей белой подложкой, и аналогично для тех же красок с изменением порядка цветов. В обоих случаях очевидно преобладающее влияние верхнего слоя.

На фиг. 18.18 приведены спектральные кривые отражения для той же самой красной краски, смешанной с белой в трех различных пропорциях и нанесенной на белую подложку. Если эти кривые сравнить с кривыми фиг. 18.16, видно, что более высокая насыщен-

ность прозрачной красной краски получается при нанесении ее на белую подложку, а не в том случае, когда она смешивается с белой краской. Этот способ повышения насыщенности прозрачных красок позволяет расширить палитру красителей, доступных художнику. Подобный результат достигается и тогда, когда художник лессирует свои краски, используя их в тонких слоях, ровно наложенных поверх другой краски соответствующего цвета. На фиг. 18.19 показаны цветности красок, кривые спектрального отражения которых приведены на фиг. 18.15—18.18.

Смешение красок, следовательно, является искусством, а не наукой, так как для получения желаемого результата требуется детальное знание особенностей и свойств каждой отдельной краски. Для прозрачных окрашенных сред не имеет большого значения, смешаны ли они или наложены, и изменение толщины и концентрации почти одинаково влияет на цвет. Эти закономерности совершенно непригодны для красок. С другой стороны, цветовые эффекты, которые могут быть достигнуты с помощью красок, с художественной точки зрения превосходят те, которые можно получить, используя другие средства. Особенности отражения и рассеяния света в слое краски придают каждой краске свой собственный оттенок и могут быть использованы художниками. Краски почти одинакового цвета, но имеющие различную степень непрозрачности и различную кроющую способность, могут быть использованы для получения именно того эффекта, который требуется художнику.

Главным образом по этой причине художник использует очень много различных красок, хотя по теории субтрактивного смешения считается, что он может с успехом обойтись значительно меньшим количеством.

ГЛАВА XIX

Цвет в фотографии

За последние годы цветная фотография стала доступной в масштабах, позволяющих применять ее для многих целей и в весьма разнообразных условиях. В ряде случаев достаточно при этом получить на фотографии «правильно распознаваемые» цвета, т. е. такие, тона которых можно назвать одинаковыми с цветами оригинала.

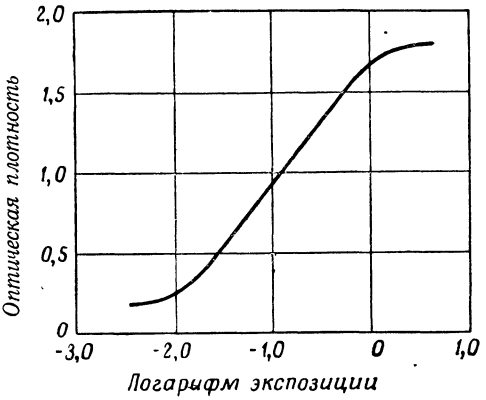
Однако тот, кто изучает цвет и умеет тщательно его оценивать, сразу обнаружит, что фотографии отличаются от оригинала во многом. Если человек заинтересовался этим вопросом лишь случайно, он будет рассматривать расхождения в цвете как дефекты конкретной фотографии, и это его мнение получит некоторое подтверждение в значительных вариациях цветопередачи, встречающихся во всех подобных процессах. Однако при более тщательном изучении вопроса станет очевидным, что дело здесь не только в особенностях конкретного фотопроцесса. Чтобы правильно оценивать результаты и полнее использовать возможности фотографии, необходимо понимать не только то, как цветная фотография получается, но и каким образом плоская репродукция может сравниваться в целом с освещенным объемным оригиналом. В этой фазе у фотографа и художника много общих проблем. Данная глава и посвящена этим проблемам в их общей форме.

В следующей главе рассматриваются те же вопросы по отношению к художнику.

Чувствительность галоидов серебра

Цветная фотография во всех ее формах основана на воздействии света на галоидо-серебряную фотографическую эмульсию. Кристаллы галоидного серебра, суспендированные в желатине эмульсионного слоя фотопленки, обладают удивительным свойством превращаться под действием света в металлическое серебро в количествах, прямо пропорциональных интенсивности экспонирования. Так называемая фотографическая эмульсия (фотослой) состоит из множества крошечных кристалликов, каждый из которых обладает слегка различной чувствительностью к свету. Когда на такой кристаллик

попадает достаточное количество света, он может в процессе дальнейшей обработки специальным химическим веществом, называемым проявителем, разложиться до металлического серебра. Статистическая совокупность всех кристаллов определяет собой общие световые характеристики эмульсии. Здесь мы рассмотрим в основном две из этих характеристик. Первая представляет собой соотношение между фотографическим действием и экспозицией, а вторая — характер спектральной чувствительности.



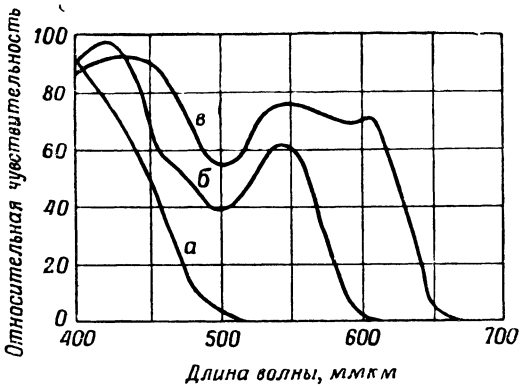
Ф и г. 19.1 Типичная характеристическая кривая фотографической эмульсии.

Если фотографическому материалу дана градация (ряд) экспозиций и затем материал проявлен, то в результате получается ряд концентраций металлического серебра, возрастающих с экспозицией. Типичная кривая такого рода (так называемая характеристическая кривая) приведена на фиг. 19.1, где по оси ординат отложены значения фотографической оптической плотности, а по оси абсцисс — логарифмы экспозиции. Фотографическая плотность в первом приближении может считаться равнозначной концентрации серебра. Она измеряется путем определения светопропускающих свойств фотослоя и вычисляется как логарифм числа, обратного коэффициенту пропускания. Визуально плотность соответствует почернению слоя; одинаковые разности плотностей выглядят на глаз почти одинаково.

Экспозиция нанесена в логарифмической шкале, так как, во-первых, перекрываемый интервал для линейной шкалы слишком велик (часто более 10 000:1 по интенсивности) и, во-вторых, логарифмическая шкала ближе соответствует шкале светлоты, в связи с чем одинаковые разности логарифма экспозиции ($\Delta \lg H$) воспринимаются глазом как одинаковые различия в светлоте.

Если характеристическая кривая данной эмульсии представляет собой прямую линию с наклоном, равным единице (угол 45°, если используемый масштаб одинаков по обеим осям), надлежащая экспозиция материала дает точное воспроизведение любого яркостного ряда, но с обратным порядком яркостей, т. е. наиболее темные участки снимка соответствуют наиболее светлым участкам оригинала и наоборот. Полученное таким образом изображение

называется негативом. Негатив можно далее использовать как объект и, сфотографировав или «отпечатав» на такого же рода материале, получить правильную репродукцию. Это результирующее изображение называется позитивом.



Ф и г. 19.2. Кривые относительной спектральной чувствительности трех типов фотоэмульсий.

а — сине-чувствительная или несенсибилизированная эмульсия; *б* — ортохроматическая, чувствительная к синей и зеленой частям спектра одновременно; *в* — панхроматическая эмульсия, чувствительная к синему, зеленому и красному излучениям.

Если применяется особый процесс проявления с так называемым обращением, можно получить правильную репродукцию или позитив непосредственно на том же фотослое (снимке), который был экспонирован при съемке. Мы будем здесь рассматривать только позитивное изображение, поскольку любой негатив является просто промежуточной ступенью для получения позитива.

В цветной фотографии субтрактивного типа серебряное изображение, образующееся при проявлении, на какой-либо стадии процесса замещается красителем. Замещение это происходит таким образом, что концентрация красителя изменяется в соответствии с концентрацией серебра. В конечном результате получается ряд концентраций красителя, связанных с величинами экспозиций теми же соотношениями, что и серебро в позитиве. Кривую фиг. 19.1 можно в связи с этим рассматривать и как характеристику эмульсионного слоя с серебром, и как характеристику слоя эмульсии с красителем. При экспонировании эмульсии в цветном процессе обычного типа образуется, таким образом, ряд концентраций красителя.

Галоиды серебра чувствительны обычно лишь в коротковолновой части спектра, причем точная область чувствительности зави-

сит от того, какое серебро используется — хлористое, бромистое или их смесь—и содержится ли в эмульсии серебро иодистое. Однако при любых обстоятельствах чистые или смешанные галоиды чувствительны только в коротковолновой части спектра, ограниченной зеленой зоной. Они могут быть, однако, «очувствлены» ко всему видимому спектру и даже к ближней инфракрасной зоне за счет применения специальных красителей, называемых сенсибилизаторами (или оптическими сенсибилизаторами), которые обладают свойством поглощать свет и передавать его действие кристаллам галоидного серебра, в результате чего они становятся проявляемыми.

Относительную чувствительность эмульсии к разным длинам волн можно изобразить графически таким же образом, как и чувствительность глаза. На фиг. 19.2 приведены такие кривые чувствительности для эмульсий различных типов. Комбинированием различно сенсибилизированных эмульсий и применением прозрачных окрашенных светофильтров можно ограничить ту область спектра, которая будет создавать экспозицию каждого данного фотослоя.

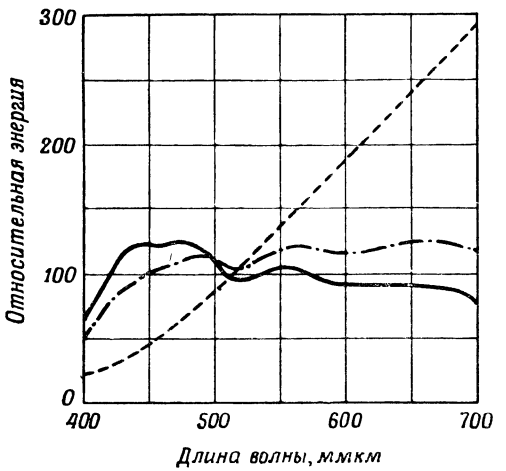
Законы взаимозаместимости и аддитивности

Фотоматериалы обладают еще и другими свойствами, без которых их использование было бы затруднено. Важно отметить, что их реакция определяется не интенсивностью падающего на них света, а общим *количеством* световой энергии, достигающей их за время экспонирования. С достаточно хорошим приближением можно считать, что конечный результат (почернение) зависит от экспозиции H, равной *произведению* интенсивности (освещенности фотослоя) E на время экспонирования t, так что экспонирование в течение 0,1 *сек* при интенсивности света, равной 1, дает такой же результат, как экспонирование в течение 0,2 *сек* при интенсивности света, равной $^1/_2$, и т. д. Это свойство известно как закон взаимозаместимости в том смысле, что время и интенсивность света являются величинами, взаимно заменимыми ($H = Et$). Этот закон нарушается, однако, при предельных значениях интенсивности и времени.

Интересным расширением этого закона, имеющим непосредственное значение для цветной фотографии, является то, что фотоэмульсия также подчиняется так называемому закону аддитивности. По этому закону следует, что если световые потоки двух различных длин волн подобраны по интенсивности так, что при данном времени экспонирования после проявления получаются одинаковые плотности почернения, то можно смешать половину интенсивности одной длины волны с половиной интенсивности другой или $^1/_{10}$ одной с $^9/_{10}$ другой и т. д., и во всех этих случаях будет получена одинаковая плотность. Другими словами, если однажды установлена фотографическая равноценность световых потоков разного цвета,

то для эмульсии не имеет значения, в какой пропорции они далее смешиваются, так как результат будет одинаковым (закон Ван-Кревельда).

Отсюда вытекают очень важные следствия для цветной фотографии. Так, легко показать, что реакция фотоэмульсии на окрашенный свет является просто суммой фотографического действия света



Фиг. 19.3. Кривые спектрального распределения энергии трех различных источников света, дающих одинаковую экспозицию панхроматической фотопленки (фиг.19.2, кривая *в*), при одинаковом времени экспонирования для всех трех источников.

всех длин волн. Следовательно, чтобы рассчитать результат экспонирования фотослоя окрашенным светом, необходимо лишь перемножить ординаты кривых спектрального распределения энергии света на ординаты кривых спектральной чувствительности фотоматериала и сложить все произведения. В этом отношении процесс по существу идентичен реакции каждого из трех цветочувствительных приемников глаза, в которых также происходит суммирование действия света различных длин волн. Следует, однако, иметь в виду, что на результат оказывают некоторое влияние также и те области длин волн фотографируемого излучения, которые сами по себе не способны образовывать фотографическое изображение.

Точно так же, как и для глаза, существует бесконечное множество вариантов спектральных распределений энергии, под действием каждого из которых за данный промежуток времени в данной эмульсии создается одинаковая фотографическая плотность. Более того, когда эта плотность будет получена, уже не будет иметь значения

природа излучения, действовавшего на фотоэмульсию. Три таких фотографически равноценных распределения энергии нанесены на графике фиг. 19.3.

Ниже изложены основные свойства фотографического процесса, на которых основана цветная фотография. Логарифмический ряд экспозиций, отличающихся по времени, или по интенсивности, или по тому и другому, приводит к образованию приблизительно линейного ряда концентраций красителя или серебра, т. е. возрастание логарифма экспозиции сопровождается приблизительно пропорциональным возрастанием концентрации. Существует некоторая наименьшая экспозиция, ниже которой фотоэмульсия не реагирует (не чернеет), и наибольшая, выше которой не происходит дальнейшего увеличения плотности. Предельный интервал экспозиций включает наряду с областью постоянного отношения приращений плотности к приращениям логарифма экспозиции (область пропорционального изменения плотности) область возрастания и область убывания этого отношения (см. фиг. 19.1). Фотоэмульсия реагирует на общее количество света, который падает на нее за время экспозиции, и на эффективность всей энергии в каждом интервале длин волн.

Фотографические системы с тремя приемниками

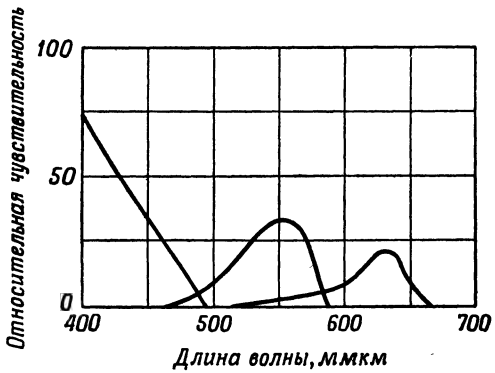
В предыдущих главах отмечалось, каким образом глаз, обладающий чувствительностью в трех основных областях спектра, может различать цвета по соотношению реакций трех приемников. Было также показано, как эта трехкомпонентная система приемников приводит к существованию тождественных цветов с различными распределениями энергии и к многообразию различаемых цветов вообще. Так как фотографическая эмульсия представляет собой приемник *подобного же типа*, можно скомбинировать три такие эмульсии в аналогичную трехкомпонентную систему со многими аналогичными результатами и следствиями.

В типичном трехцветном процессе используются три эмульсии, каждая из которых чувствительна в соответствующей трети спектра. Типичная система таких эффективных чувствительностей показана на фиг. 19.4. Слово «эффективные» применяется нами потому, что результирующая форма кривой создается здесь отчасти или полностью за счет действия светофильтра (что более легко осуществить), а не одной лишь чувствительностью эмульсии, как таковой.

Если теперь все три эмульсии экспонировать при съемке одного и того же объекта, то каждая зафиксирует световую эффективность различных его участков в соответствии со своей спектральной чувствительностью и будет получено определенное соотношение трех плотностей для каждого цвета, различаемого этой системой. Если каждая эмульсия образует изображение, в котором серебро заменено

красителем, и эти три красителя различны, то каждый различаемый цвет будет представлен определенным соотношением концентраций трех красителей. Если далее все три изображения будут наложены одно на другое, цвет проходящего сквозь них света будет различен для каждого различаемого цвета объекта.

Сознательно описание сделано нами в общих выражениях, так как основой фотографического цветного процесса такого типа является



Ф и г. 19.4. Кривые эффективной спектральной чувствительности типичного трехцветного фотографического процесса.

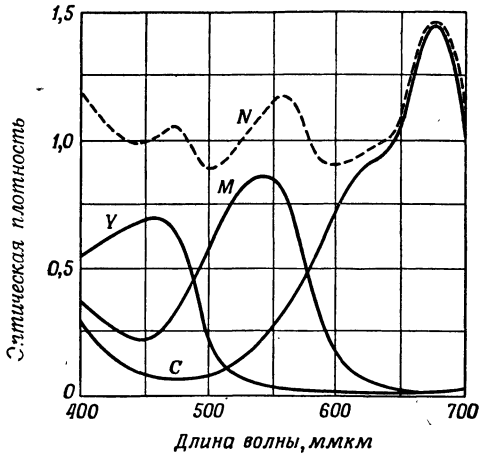
просто новая трехкомпонентная система, в принципе подобная трехкомпонентной системе цветового зрения. Ее реакция на фотографируемый объект приводит к образованию ряда цветов, определяемых относительными экспозициями, полученными тремя эмульсиями, от объекта с данным спектральным распределением энергии. Конкретные цвета, образуемые данной системой трех спектральных чувствительностей приемников (эмульсий), зависят от закономерностей смешения трех используемых красителей и от соотношений между величиной экспозиции и количеством красителя для каждой эмульсии.

Цель цветной фотографии

Вообще считают, что целью цветной фотографии является получение изображения, по возможности более схожего с оригиналом (объектом). Хотя нет полной теории того, как это сделать, однако теоретически возможно, используя описанную выше систему, получить цвета, воспринимаемые глазом такими же, как на оригинале, при рассматривании их в идентичных условиях. Отвлекаясь временно от проблемы восприятия конечной картины в целом, цвета,

создаваемые красителями, могут выглядеть так же, как на объекте. Другими словами, для стандартного наблюдателя цвет прозрачной смеси красителей может иметь в цветовом графике МКО ту же самую цветность, как и цвет отражающей поверхности объекта.

Экспериментально было найдено, что приближенное решение этой проблемы достигается в том случае, если три красителя, используемых в цветном фотографическом процессе, удовлетворяют



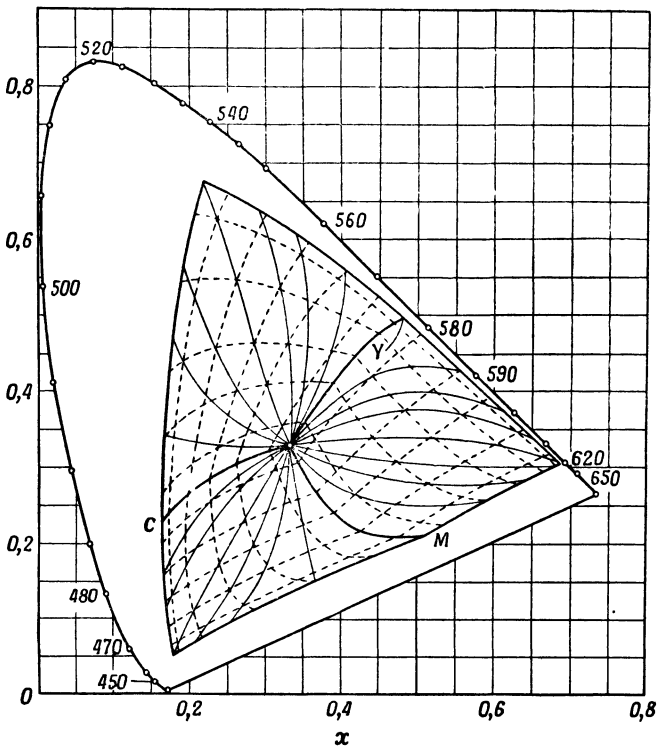
Ф и г. 19.5. Спектральные кривые оптической плотности для трех красителей (сплошные кривые) и для их нейтрально-серой смеси (пунктирная кривая).

двум особым требованиям: чтобы их комбинация в некотором определенном соотношении давала нейтрально-серый цвет и чтобы каждый краситель поглощал свет, приблизительно в $^1/_3$ спектра отличный от областей поглощения двух остальных красителей.

Хотя этому нет прямого доказательства, представляется вероятным, что любая система из трех красителей, каждый из которых поглощает приблизительно $^1/_3$ спектра, при некотором соотношении смеси и определенном освещении образует визуально нейтральный цвет. Такая возможность полностью используется в цветной фотографии. Например, система красителей, приведенных на фиг. 19.5, в указанных концентрациях образует в сумме нейтрально-серый цвет, показанный кривой N.

В цветном фотопроцессе при съемке нейтрально-серого участка объекта все три эмульсии реагируют на распределение энергии источника света, освещающего этот участок. Если при этом отложение красителей в трех эмульсиях также образует нейтрально-серый

цвет, одно из условий правильного воспроизведения цвета будет выполнено. Необходимо, конечно, чтобы такое условие соблюдалось при всех яркостях объекта и всех экспозициях. В реальных процессах это условие обычно хорошо соблюдается. Остается теперь рассмотреть, в какой мере система, удовлетворяющая этому условию, удовлетворяет также требованию точного воспроизведения цветных участков объекта.

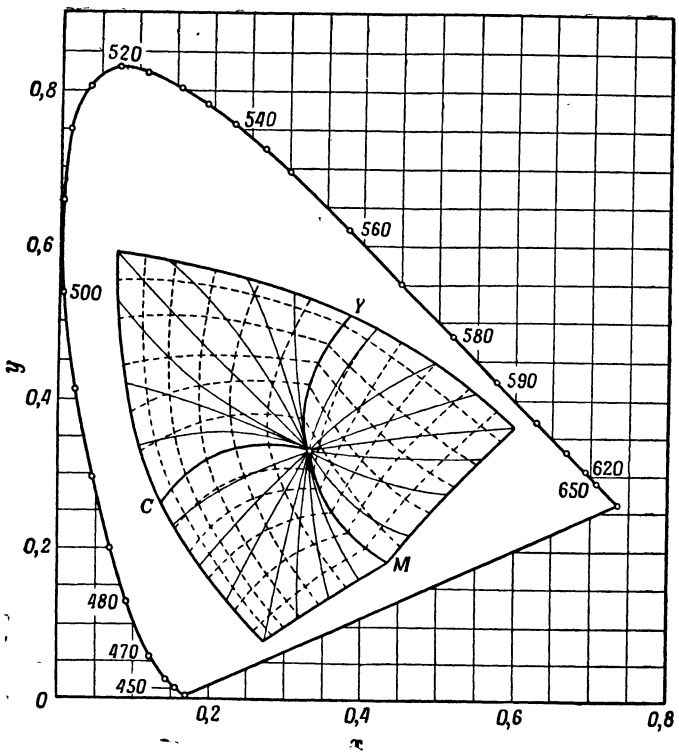


Фиг. 19.6. Цветовой график смешения трех красителей, рассчитанный в системе МКО по кривым фиг. 19.5.

Как уже говорилось ранее, не существует теоретической основы, с помощью которой могут быть определены требуемые спектральные чувствительности для данной системы красителей. Однако можно рассчитать реакцию (результат съемки) для данных условий и сравнить цвет изображения, полученный расчетным путем, с цветом объекта, принятого за оригинал. Все видимые цвета, которые получаются при всех практически возможных соотношениях реакций трех

эмульсий, могут быть рассчитаны и нанесены на график колориметрической системы МКО.

Положим для примера, что экспонирование данной системы эмульсий белым светом дает поглощение света тремя красителями, показанное на фиг. 19.5. По этим кривым поглощения, учитывая соотношение количеств трех красителей и вычисляя реакцию



Ф и г. 19.7. Цветовой график смешения трех красителей, отличающихся от красителей фиг. 19.6, но с соотношениями концентраций, управляемыми той же системой спектральных чувствительностей трех эмульсий, что и для фиг. 19.6.

стандартного наблюдателя на пропускаемый этими красителями свет, можно рассчитать те отношения экспозиций трех эмульсий, которые необходимы для получения любого заданного цвета. На фиг. 19.6 в виде сетки, нанесенной на цветовом графике МКО, показаны результаты расчетов цветностей, получаемых при всех возможных соотношениях красителей. Обычно при помощи таких красителей может быть воспроизведена весьма значительная часть всей области

видимых цветов спектра. Однако всякая другая система подобных красителей при тех же соотношениях концентраций дала бы несколько иную систему цветов (другой так называемый цветовой охват). Для сравнения сетка такой системы показана на графике МКО фиг. 19.7. Обычно, если даже спектральные чувствительности эмульсий, управляющих содержанием красителей в позитиве, одинаковы с предыдущей системой, получающиеся цвета репродукции одних и тех же цветов оригинала будут в этих двух системах с разными красителями во многих случаях различны[1]. Нам предстоит теперь рассмотреть, какие условия необходимо соблюдать, чтобы воспроизвести данную цветность объекта, и какие условия необходимы для получения одинаковых результатов от всех объектов, воспринимаемых глазом как одинаковые.

Оба эти требования могут быть сведены к условиям, чтобы три эмульсии имели такие же соотношения реакций на всевозможные распределения энергии по спектру, как три теоретических приемника глаза, и чтобы концентрации красителей при этих соотношениях создавали бы светопоглощение, образующее правильные (такие же, как на оригинале) цвета для наблюдателя.

Можно показать, что первый результат может быть получен только в том случае, если кривые спектральной чувствительности трех эмульсий будут совпадать по действию с кривыми чувствительности трех приемников глаза. Это условие следует из того простого факта, что для каждого возможного цвета существует бесконечное множество распределений энергии, воспринимаемых глазом как одинаковые, и что это же требование должно выполняться и для эмульсий. Отсюда спектральные кривые чувствительности в общем случае должны быть идентичными. Второе требование, заключающееся в том, чтобы сами красители в этих соотношениях концентраций давали точное воспроизведение цветов, не может быть в настоящее время принято, хотя известны теоретические системы красителей, удовлетворяющие этому требованию. Как можно видеть из фиг. 19.6 и 19.7, многие комбинации красителей, удовлетворяющие последнему требованию при съемке нейтрально-серого, в общем случае (при съемке цветных объектов) ему не удовлетворяют. Однако практически получаются неожиданно удовлетворительные результаты с любой системой красителей, позволяющей управлять световым потоком приблизительно в таких же трех областях спектра, которые являются эффективными для трех приемников глаза.

---

[1] Вопрос о точности воспроизведения цвета при цветной репродукции подробно исследован Нюбергом, согласно которому следует различать три типа репродукции: физически точную, физиологически точную и психологически точную. См. [11] в списке дополнительной литературы.— *Прим. ред.*

Погрешности существующих процессов

Существующие цветные процессы включают в себя найденные опытным путем системы, которые в среднем дают хорошее воспроизведение цветов натуральных объектов. Для практических целей нет необходимости добиваться большего. Важно, однако, указать, что погрешности таких процессов могут быть двух видов. Во-первых, цвета объектов, получающиеся одинаковыми на фотографии, не будут иметь в общем таких же спектральных распределений энергии, как цвета, одинаковые по восприятию для глаза, и, во-вторых, цвет репродукции с некоторым конкретным распределением энергии не будет идентичен видимому цвету, вызываемому непосредственно этим распределением энергии. Хотя второе из этих обстоятельств имеет, пожалуй, большее значение, чем первое, для точной цветопередачи всех объектов требуется, чтобы выполнялись одинаково хорошо оба условия.

Приходится, однако, констатировать, что существующие цветные процессы не удовлетворяют ни одному из этих требований. Действительные кривые спектральной чувствительности глаза не известны, и это делает невозможным сравнение с ними кривых чувствительности эмульсий. Существующие красители имеют некоторые ограничения в отношении спектральных кривых поглощения. Тем не менее в отношении суммирования и оценки распределений энергии каждый цветной процесс обладает таким же *типом* характеристик, что и глаз. Для каждого цвета, воспроизводимого системой, существует бесконечное множество возможных спектральных распределений энергии. Каждая система дает нейтральное (ахроматическое) изображение при некотором данном распределении энергии объекта. Однако это не означает, что распределение энергии, нейтральное на объекте, будет обязательно белым или серым на изображении или что два спектральных распределения энергии, визуально тождественных по цвету, будут также тождественны фотографически, хотя многие цветные процессы удивительно хорошо удовлетворяют обоим этим требованиям.

Адаптация зрения и фотография

До сих пор мы имели дело с результатами такого цветного процесса, которому в отличие от зрения приписывали постоянные, фиксированные характеристики. Как это видно из рассмотрения харак, теристик зрения, описанных в предыдущих главах, свойства глаза не являются неизменными. В каждых конкретных окружающих условиях глаз «настраивается» и регулирует соотношение чувствительностей своих приемников так, что он становится по своему действию как бы нулевым прибором, показывающим отклонения

каждого частного участка объекта от средней яркости и среднего цвета объекта в целом. Цветной фотопроцесс вовсе не выявляет таких отклонений цветов от среднего, но в отношении яркости делает это точно так же, как глаз, если установлена правильная экспозиция при съемке. Что же касается цветов, то в действительности фотопроцесс оказывается настроенным не на средний цвет объекта, а на цвет того определенного освещения, которое устанавливается в качестве «нормального» или «балансного» изготовителями данного цветного фотоматериала.

Оптическая плотность каждого снятого цвета (участка) на цветной фотографии определяется той экспозицией, которая применялась при съемке. Относительные же концентрации красителей в любой точке определяются реакциями трех эмульсий по отношению к их реакциям при балансном освещении. В обоих случаях результат полностью определяется физическими показателями без учета какого-либо воздействия одних участков на другие и безотносительно к характеру оригинала (объекта) в целом [1].

Это соответствует точному воспроизведению объекта по оценке неизменного стандартного наблюдателя. Если бы репродукция была такова, что этот стандартный наблюдатель видел бы на ней такие же цвета, какие он видит на оригинале, не оставалось бы больше никаких проблем. К сожалению, в действительности это не так. Чтобы увидеть, почему это не так, необходимо рассмотреть психологию зрительного процесса.

Сравнение оригиналов с репродукцией

Установлено, что в процессе восприятия скорее оцениваются существующие свойства оригиналов и их освещение, чем физические соотношения энергий, попадающих в глаз. Помещенный в тень белый предмет, например, продолжает выглядеть белым, а не серым, хотя очевидно, что его яркость здесь понижена. Точный физиологический механизм, благодаря которому проявляется эта тенденция, не ясен, и может оказаться, что в конечных исследованиях придется его рассматривать как явление чисто психологическое.

---

[1] Требование точного соответствия кривых чувствительности трех эмульсий кривым чувствительности глаза не является обязательным. Как показал Нюберг, отраженные излучения, совпадающие по цвету, обычно весьма близки также и по спектральным кривым отражения. Поэтому удовлетворительное качество цветопередачи может быть получено и при кривых чувствительности, построенных совершенно по другому принципу, значительно отличающихся от кривых чувствительности глаза. Наиболее достоверные данные о кривых спектральной чувствительности цветочувствительных приемников глаза человека получены Е. Н. Юстовой и Н. Д. Нюбергом. См. работу [8] в списке дополнительной литературы.— *Прим. ред.*

Существующее в настоящее время положение представляется следующим. Если белый объект явно заслонен от источника света другим объектом и это является совершенно очевидным, наблюдатель различает, что предмет затенен, и восприятие целого разделяется на две части. *Предмет* воспринимается более или менее таким, как если бы освещение было одинаковым. Мы видим предмет, в значительной степени правильно воспринимая действительную отражательную способность поверхностей [1)], несмотря на, так сказать, дезориентирующее влияние освещения. Восприятие при этом происходит непосредственно и немедленно без всякого процесса размышлений, и это представляет собой замечательный пример способности мозга приспосабливаться, адаптироваться к существующим условиям. Если целью является видеть предмет, как таковой, необходимо, чтобы особенности освещения также были ясны наблюдателю. Предмет и его освещение отчетливо различаются глазом, пока выполняется одно вполне определенное требование, и это требование очень интересно в понятиях некоторой основной теории, могущей дать ему объяснение. Чтобы при таком двойном восприятии получить правильное представление о предмете, необходимо, чтобы было совершенно очевидно, что́ создает освещение и что́ образует тень. В зависимости от того, насколько это очевидно или неясно, может получиться различное восприятие. Предположим, например, что тень отбрасывается предметом, невидимым наблюдателю, и что эта тень точно покрывает один из объектов наблюдения. В этих условиях пониженная яркость будет истолкована не как тень, а как пониженная отражательная способность объекта. Действительно, здесь наблюдатель был лишен возможности сделать различие между освещением и отражательной способностью поверхности, и это должно было привести его к мнению, что пониженная яркость является свойством объекта, поскольку другой причины увидеть он не мог. Более интересным является, однако, тот факт, что в тех случаях, когда характер освещения не ясен, *возрастают ошибки* в психологическом разделении свойств и характеристик освещения и предметов. Недостаток очевидности, ясности в характере освещения приводит к тому, что воспринимаемый внешний вид предметов все более определяется освещением и все менее действительными отражательными способностями поверхностей. В предельном случае, когда нет никаких заметных показаний и данных об освещении, *все* имеющиеся различия *видны* (не истолковываются, а именно видны) как свойства предметов.

Что же касается фотоизображения, то оно состоит по существу сплошь из репродукций малых участков сцены, в которой главные

[1)] Указанное психологическое явление принято называть «поправкой на освещение».— *Прим. ред.*

объекты занимают бóльшую часть репродуцированной площади и источник света или условия освещения редко изображаются на нем непосредственно. По этой причине фотография редко вызывает у наблюдателя восприятие освещения, приближающееся к тому, которое имелось бы, если бы он непосредственно смотрел на фотографируемую сцену в натуре. При этом из-за недостаточного восприятия условий освещения здесь также будет иметь место некоторый перенос вариаций освещения на воспринимаемые свойства поверхностей, видимых на изображении.

Тени, фоны и яркостные перепады

В результате влияния этих факторов на цветную фотографию имеют место следующие явления.

1. Всякая тень на фотографии имеет тенденцию казаться темнее, чем она была в оригинале, и иногда очень намного. Степень усиления тени зависит от ясности восприятия освещения, как такового.

2. Если освещение на фотографии неоднородно, значительная часть этой неоднородности будет восприниматься как свойства самих воспроизведенных объектов, если нет явных признаков теней и точных показателей того, как отличается освещение различных участков этих объектов.

3. Если какой-либо предмет на фотографии, например фон, совершенно отделен от остальной картины, любое различие в освещении этой части будет полностью выглядеть как свойство фона и совершенно не будет заметно, какую роль играет здесь освещение. В этом, в частности, заключается один из трудноустранимых дефектов фотографии. Фон, всегда расположенный на некотором расстоянии от главного объекта, воспринимается нами так, как будто он имеет ту же освещенность, что и объекты, расположенные на переднем плане; при этом на фотографии он выглядит очень темным. Попытка проиллюстрировать это показана на вклейке XIV. Это — чисто зрительный эффект, возникающий благодаря ограничению площади, видимой на изображении, и он не имеет другого непосредственного отношения к фотографии. Чтобы получить убедительную репродукцию, приходится сознательно освещать фотографируемые объекты так, чтобы они выглядели для фотографа отличными от тех, какими хотят их передать, с тем чтобы на фотографии отдельные их части получились такими, как это желательно. Это — закономерное обобщение, применимое ко всем репродукциям. Зрительные явления, которые имеются, когда в натуре рассматриваются объекты в целом, отсутствуют, когда наблюдение ограничено небольшим участком; в последнем случае отсутствие их должно быть искусственно восполнено, с тем чтобы *объекты* на изображении выглядели натурально.

Изменение цветовых тонов

До сих пор мы ограничивались обсуждением вопросов восприятия яркости отдельных поверхностей. Очень схожее положение существует и в отношении цвета. Чтобы в этом разобраться, возьмем классический пример с оранжево-красной вазой, освещенной с одной стороны солнечным светом при общем освещении рассеянным белым светом, так, чтобы теневая сторона вазы выглядела намного темнее освещенной. Как показывают исследования цветового зрения человека, цветовой тон оранжево-красного цвета изменяется при изменении интенсивности освещения. При высокой яркости он смещается по направлению к желтому, а при низкой — к пурпурному. Если мы смотрим непосредственно на вазу, то видим ее просто оранжево-красной с равномерным цветом поверхности, но *освещенной с одной стороны больше*, чем с другой. Теперь предположим, что мы изготовили маску из куска серого картона с отверстием в середине и держим ее так, что через отверстие видна только небольшая часть вазы. Если при этом маску перемещать так, чтобы видеть сначала ярко освещенную сторону вазы, а затем теневую, то ее оранжево-красный цвет будет изменяться от желто-оранжевого до красно-пурпурного. Тренированный наблюдатель может увидеть это изменение цветового тона объекта и без маски, для неподготовленного же наблюдателя в этом случае смещение цветового тона окажется незаметным. Следовательно, поскольку изменение цветовых тонов, вызванное неравномерностью (перепадом) освещения, заметно только при тщательном наблюдении, *обычный* наблюдатель видит лишь равномерные цвета поверхностей и неравномерное освещение.

До того, как мы будем в состоянии рассмотреть особенности фотографической репродукции такого объекта, необходимо ознакомиться еще с одним фактором. Оранжево-красная ваза при указанных выше условиях освещения с освещенной боковой стороны кажется *ярче*, а с теневой — *темнее*, чем спереди, и при этом цвет передней части вазы воспринимается как ее *действительный*, правильный цвет (оранжево-красный), а цвет освещенной стороны — как переходящий в направление к *более яркому* желто-оранжевому. Такое восприятие объясняется тем, что общий уровень яркостной адаптации зрения более близко соответствует здесь промежуточному (среднему) освещению, имеющемуся спереди, а боковые стороны оцениваются по отношению к этой передней части вазы. Если же по какой-либо причине зрение адаптировано на уровень, соответствующий *высокой* яркости, то нормально освещенной будет выглядеть более яркая боковая сторона вазы и эта сторона будет теперь иметь оранжево-красный (правильный) цвет, а все остальные участки вазы будут плавно переходить в тень, изменяя одновременно цвет в направлении от оранжево-красного к пурпурному.

Если мы изготовим теперь цветную фотографию этой освещенной вазы с точным воспроизведением ее цветностей, то результат при рассматривании фотографии будет совершенно другим. На основании сказанного выше можно установить следующие причины этого различия. Когда фотографическое изображение рассматривается в обычных условиях освещения, уровень адаптации зрения устанавливается не по изображению, а по его белой окантовке и по окружающему фону в целом. Обычно кайма видна как белая, а все изображение выглядит более темным. Поскольку визуальное явление смещения цветового тона более освещенной стороны вазы в направлении желтого происходило благодаря тому, что яркость здесь была *выше* уровня адаптации, и этот визуальный эффект определял собой непосредственное восприятие очень высокой яркости, *оба* эти явления в репродукции *будут отсутствовать*. Таким же образом если рассматривать репродукцию в условиях, когда окружающие ее предметы намного темнее, чем теневая сторона вазы на изображении, то тени на репродукции тоже не будут вызывать значительного смещения цветового тона и не будут способствовать правильному восприятию освещения объекта. В результате на репродукции *не будут* воспроизводиться в такой же мере, как на само́м объекте, ни смещения цветового тона, могущие быть заметными для тренированного наблюдателя, ни восприятие направленного освещения, свойственное обычному наблюдателю. Другими словами, изображение объекта *не будет выглядеть подобным* оригиналу даже в том случае, если предположить, что на нем точно воспроизведены яркости и цветности оригинала.

Здесь снова, как и в случае восприятия яркости поверхностей, правильный эффект самой сцены воспроизводится на фотографии только тогда, когда цветности на ней *фактически* изменены так, чтобы по возможности возместить их искажение вследствие ограниченности воспроизводимого при съемке участка объекта. Для такого изменения цветности при съемке может быть использовано тщательно подобранное окрашенное освещение при условии, что это допускается характером объектов.

Отражение от поверхностей

Яркость и цветовой тон поверхностей на фотографии могут выглядеть правильными только в том случае, если освещение при съемке видоизменено так, чтобы обеспечить правильное восприятие снимка. Существует еще и третий фактор, который может вызвать совершенно неверное восприятие объектов на репродукции. Предположим, что глянцевый предмет дает на своей поверхности сильно размытое отражение источника света (широкий блик). В натуре перемещение предмета или головы наблюдателя быстро выявили бы

истинное положение дел и возникла бы психологическая компенсация потери насыщенности цвета объекта, вызванной отраженным светом. На фотографии же подобные действия невозможны и такое отражение будет восприниматься как действительный цвет поверхности объекта. Средство против подобных искажений простое — избегать таких отражений. В случае же металлических поверхностей подобное отражение источников света является единственно возможным способом сделать предмет видимым.

Как следует из вышеизложенного, получение фотографий, на которой все объекты будут выглядеть точно так же, как при их непосредственном рассматривании в натуре, является сложным художественным процессом, требующим много искусства и опыта. В предельных случаях могут встретиться такие сочетания объектов, которые по существу невозможно правильно воспроизвести, даже если используемый фотографический процесс совершенен в том отношении, что он точно воспроизводит все цветности и все яркости сцены.

Цвет освещения

В наших рассуждениях ничего не было сказано об общей окраске света, применяемого для освещения объектов. Как показывает рассмотрение механизма фотографического процесса, свет только одного определенного цвета (такого, который дает правильное, балансное соотношение экспозиций трех эмульсий) будет воспроизведен на фотографии как белый или серый. Если объект освещен светом любого другого цвета, он будет фотографироваться с соответствующей окраской по отношению к балансному источнику, для которого разработаны применяемые эмульсии. Если свет голубее, чем требующийся балансный, объект будет получаться на фотографии голубоватым и т. д. Это явление опять-таки отличается от реакции человека, наблюдающего натуру. Для него свет голубее обычного дневного или искусственного света будет казаться *белым* после некоторого времени наблюдения. Однако при рассматривании репродукции в дневном свете освещение на ней будет видно как голубое, поскольку имеющийся теперь действительный дневной свет (на белой окантовке окружающих предметах и т. п.) создает критерий для сравнительной оценки. Изображение ахроматических объектов, сфотографированных при свете, на который рассчитан данный фотоматериал, будет, конечно, выглядеть серым или белым независимо от того, будут ли его рассматривать при дневном свете или каком-либо другом нормальном источнике.

Таким образом, с точки зрения специалиста по цвету фотография не является точным воспроизведением натуры, помещенной перед фотоаппаратом, как это обычно считается; чтобы сделать ее такой, необходимо, чтобы фотографируемая натура была четко проанали-

зирована фотографом визуально и те решающие факторы конечного восприятия, которые могут отсутствовать на репродукции, были восполнены соответствующим сознательным *искажением* цветов и яркостей самой натуры. Эффект от такой коррекции при лучших из существующих цветных процессов часто может полностью компенсировать дефекты репродукции.

Очевидно, что высокая степень художественности, если можно так выразиться, может быть достигнута при удовлетворительном цветном фотопроцессе в сочетании со всем техническим мастерством, которое может быть приложено к фотографическому процессу, *как к таковому*. Однако цветная фотография предназначена далеко не только для профессионалов. Механизм зрительного восприятия быстро приучается преобразовывать фотографическое изображение в убедительное представление о самих объектах, и наблюдатель оказывается вполне удовлетворен результатом. Приведенные положения были взяты здесь в предельных случаях с целью полнее разъяснить, что необходимо для более точного фотографического воспроизведения натуры в том виде, в каком она воспринимается наблюдателем. В следующей главе будет показано, как художник, воспроизводящий натуру точка за точкой, может достичь более точного сходства.

Следует также заметить, что изложенные выше положения относятся не только к цветной фотографии, как к таковой. Изолированное рассматривание через отверстие, например наблюдение предмета, видимого без фона в окне, репродукции в журнале и т. п., или любая из множества других подобных ситуаций может дать равноценные «ошибочные» эффекты. Эти явления не ограничиваются фотографией, а являются общими свойствами самого зрительного восприятия.

Подводя итоги, следует сказать, что цветная фотография может иметь погрешности в воспроизведении цветностей, так как ее система приемников несколько отлична от приемников глаза и ее система смешения цветов также неидеальна. Она может исказить натуру вследствие изолированности снятого участка, даже если сам по себе фотопроцесс совершенен. В новейших практически используемых цветных фотопроцессах значение ошибок обоих типов в общем сопоставимо друг с другом.

ГЛАВА XX

Цвет в живописи

Художник, начиная писать картину маслом, акварелью или каким-либо другим красочным материалом, должен достаточно хорошо представлять себе цель, которую он преследует. Цели могут быть самые разнообразные, и для их достижения художник иногда может использовать цвет как один их важнейших компонентов картины. При этом, если цвету отведена в картине важная роль, он не обязательно используется только для точного воспроизведения изображаемых объектов. Проблема цвета в живописи настолько многосторонняя, что ее можно обсуждать только на отдельных примерах, взятых из огромного их многообразия, допуская при этом, что цвет в картине выполняет разнообразные функции.

Сложная роль цвета в живописи

Мы могли бы начать с тривиального утверждения, что подлинный художник в своем творчестве редко задается целью точно передать действительную окраску поверхностей предметов. Его задача — создать художественное произведение — картину. Картина представляет собой двухмерную поверхность, полностью (или частично) покрытую краской. Задача художника заключается в том, чтобы путем правильного подбора красок и использования соответствующих форм и очертаний придать картине желаемый вид. Цвет всегда играет двойную роль: декорационную и изобразительную. Однако он имеет и другое назначение. Например, цвету отводится важная роль в композиции картины, так как одни цвета гораздо больше привлекают внимание, чем другие, и, следовательно, применяя тот или другой цвет, можно выделить определенные участки картины. Художники используют это свойство, конечно, только в сочетании с другими цветами картины; например, цвет, господствующий над другим менее ярким, покажется незначительным рядом с большой поверхностью, окрашенной в еще более яркий цвет, и т. д. Цвет также может использоваться локально в качестве определяющего общий тон картины в целях передачи настроения, времени дня, а также просто для выделения определенных участков картины. В каждом случае цвет — это инструмент, помогающий художнику в достижении желаемых результатов.

В этой главе мы сначала покажем, как художник пользуется цветом для передачи трехмерных форм, а затем — в декоративных целях. Вопросы, связанные с рисунком и гармонией, будут рассмотрены в следующей главе.

Цвет объекта и восприятие

Каждый объект может характеризоваться спектральной отражательной способностью, которая может быть определена физическим путем и которую можно рассматривать как свойство данного объекта. Многообразные зрительные эффекты, рассмотренные в предыдущих главах, в целом демонстрируют это свойство при различных условиях освещения. Так, бледно-голубой объект выглядит таковым как при естественном, так и при искусственном освещении, несмотря на то что при искусственном освещении относительная энергия в красной части спектра может быть выше относительной энергии в синей.

Зрительные эффекты цветового постоянства поражают нетренированного наблюдателя тем, что независимо от того, какой свет падает на предмет, цвет этого предмета не меняется.

Тот же общий принцип, как уже упоминалось в предыдущей главе, относится и к относительной отражательной способности объектов. Объект, отражающий очень высокий процент падающего на него света всех длин волн, может показаться наблюдателю белым почти независимо от условий освещения, при которых он наблюдается.

Мы упомянули только о двух случаях из большого количества явлений, связанных со зрительным восприятием. Они показывают, что восприятие наблюдателя в действительности резко отличается от того восприятия, которое могло бы быть предсказано на основании учета только лучистой энергии, попадающей в глаз наблюдателя; так, например, свет от различных участков поверхности наблюдаемого предмета будет казаться совершенно другим, если наблюдать эти участки по отдельности.

Мы видели, что в фотографии разница между условиями зрительного восприятия действительного объекта и условиями восприятия его фотографического изображения вызывает необходимость в изменении освещения для того, чтобы получить желаемый результат. Сказанное относится и к живописи с тем только различием, что здесь можно изменять непосредственно картину, а не условия освещения воспроизводимого объекта.

Проблема тоновой шкалы

Картины, фотографические снимки и все другие виды двухмерных изображений предназначены для рассматривания в условиях равномерного освещения. Поэтому возможный диапазон яркостей

Как здесь показано, кажущаяся, видимая яркость (светлота) фона может быть совершенно отличной от действительной яркости. Так, на верхнем левом снимке освещение было такое, что вся сцена выглядела для фотографа хорошо освещенной, а на фотографии фон получился слишком темным. На верхнем правом снимке, чтобы фон фотографировался правильно, была увеличена экспозиция, но передний план при этом оказался переэкспонированным. На нижнем снимке добавочное освещение фона позволило сфотографировать всю сцену так, как она выглядела в натуре.

Влияние цветового баланса картины на ее «настроение». Нижний рисунок более «точно» отражает действительность. Однако его эффективность с точки зрения характеристики пейзажа не так велика, как верхнего.

от черного до белого определяется величиной отражательной способности отдельных участков поверхности изображения. Обычно натура, с которой пишет художник, освещается неравномерно, так как неравномерное освещение является единственным условием, при котором хорошо ощущается глубина ее. Нормальный диапазон величин коэффициентов отражения соответственно умножается в натуре на уровень освещенностей. Если натура представлена в виде картины, этот расширенный диапазон должен быть уменьшен при сохранении создаваемого им эффекта. Так как многие явления, такие, как сдвиг цветового тона при изменении интенсивности освещения, восприятие в первую очередь светлых участков картины, цветовой контраст и т. п., являются чисто зрительными явлениями и связаны с диапазоном яркостей, воспринимаемых глазом, они бы пропали, если бы картина была точной, но уменьшенной копией натуры. Художник должен это учитывать, чтобы при изменении зрительных условий картина производила такое же впечатление, как и изображаемая натура. Если это ему удастся, то зрительное восприятие картины наблюдателем опять, как и при восприятии натуры, разделится на восприятие освещенности и восприятие цвета предметов.

Обычно (хотя и не всегда) процесс создания картины идет следующим путем. Наибольший светлотный диапазон, с которым можно встретиться,— это диапазон яркостей в ясный солнечный день. Поэтому при изображении ясного солнечного дня должен быть сохранен максимальный из возможных светлотных диапазонов красок. Так как все картины смотрятся в сравнении с находящимися вблизи белыми поверхностями, этот полный диапазон не может использоваться для воспроизведения менее ярко освещенных предметов, за исключением тех случаев, когда имеет место большое искажение масштабов. Соответственно выбор ограниченного светлотного диапазона красок, который подойдет для изображения того или иного определенного мотива, является одной из первых задач художника. В пределах этого диапазона различные цвета, светлоты которых должны соответствовать различным светлотам натуры, должны располагаться на холсте в основном так же, как и в натуре. Эту работу художник может производить либо сразу, либо, предварительно грубо набросав изображение, располагая цвета в соответствии с их светлотными величинами. Таким образом он создает необходимую светлотную основу, вокруг которой затем строится картина.

Проблема цвета

Следующая задача художника обычно заключается в подборе локальных цветов для отдельных объектов натуры. Этот процесс необычайно сложен. Кажущийся цвет поверхности натуры зависит

от многих обстоятельств, влияющих на цветовое восприятие. В определенной степени он варьирует и в самой натуре, но именно только в определенной степени. Так, зеленая трава остается зеленой почти при любых условиях освещения, и ее «действительный» цвет является в достаточной степени кажущимся, за исключением особых случаев. Однако краска, которой художник воспроизводит локальный цвет натуры, не должна в точности повторять цвет данного участка натуры, хотя воспроизводимый ею объект на картине должен выглядеть по отношению к другим объектам так же, как тот, с которого он написан, выглядит в окружающем его фоне. Поэтому действительный цвет взятой художником краски может значительно отличаться от цвета изображенного на картине объекта. Подготовив краски или по крайней мере мысленно подобрав их, художник может приступать к разработке схемы распределения яркостей. Он может делать это различными способами, но результат всегда должен быть один: взятые им краски должны сочетаться не только по отношению к картине в целом, но и по отношению друг к другу. Процесс сопоставления и создания ансамбля опять-таки довольно сложен. Краска в новом окружении не выглядит так, как можно было бы ожидать. На нее оказывают влияние как соседние краски, так и вся тоновая шкала в целом. Поэтому для достижения желаемого результата художник должен уметь изменять предварительную схему распределения яркостей.

Этот процесс чрезвычайно сложен. Синий цвет рядом с желтым кажется синее и темнее, чем на палитре. Серый в тени может показаться светлее или темнее того серого, который хотел получить художник. Вся тоновая шкала картины может оказаться высокой или низкой, слишком расширенной или сжатой; когда картина будет наблюдаться в нормальном окружении, цветовой тон объектов может оказаться непостоянным. Все это и многое другое должно быть устранено. Красная ваза должна быть оттенена желтоватым цветом с освещенной стороны, фуксином — с теневой. Тон фона может показаться слишком ярким, а цвет — слишком насыщенным и неправильным из-за окраски объектов, находящихся на нем.

Однако, когда картина закончена, художник, если она ему удалась, достигает результата, который по своей сложности удивителен. Художник заставляет наблюдателя видеть то, чего на самом деле нет на его картине. Поверхности, которые в действительности имеют неравномерный цветовой тон, при сильном освещении выглядят равномерно окрашенными. Серые тона на теневых поверхностях выглядят чисто белыми. Насыщенность красок кажется такой же, как и у изображаемых предметов, однако непосредственное сравнение обнаруживает почти невероятную разницу. Художник добивается успеха, пользуясь вольным или невольным знанием того, что зрительное восприятие картины отличается от зрительного восприя-

тия натуры, поэтому картина, чтобы казаться похожей на натуру, должна отличаться от нее.

Кроме этой необходимой компенсации разницы в условиях зрительного восприятия картины и натуры, безусловно, имеется множество других тонкостей, известных только художнику, о которых при условии удачного исполнения картины наблюдатель даже не догадывается. Например, яркость белых тонов будет зависеть от контраста с картиной в целом и от светлоты непосредственно окружающих их красок. Работы ранней голландской школы отличаются ослепительно белыми тонами и очень высокой кажущейся освещенностью картины. Это достигалось тем, что большая площадь по краям картины затемнялась, а небольшие белые участки располагались вблизи ее центра.

Восприятие глубины в живописи

Заключение о том, что восприятие глубины связано с контрастностью картины, исключительно справедливо. Если картина написана только основными красками без оттенков, на ней нет теней, она будет иметь вид плоского холста. Путем соответствующего освещения и экранирования такой картины можно придать ей интересный вид. Если взглянуть на нее, она может произвести сильное впечатление единством формы и цвета. Если на картине воспроизведены только глубина и форма, такая картина является лишь плохой заменой очевидной реальности конкретных предметов. Картина должна отражать индивидуальность художника. Наблюдатель может сказать, что картина отражает реальный мир таким, каким он воспринимается художником.

Поэтому нельзя говорить о цвете в живописи, исключая вопрос эмоциональности. Однако не следует игнорировать и физическую сторону вопроса, влияющую на восприятие картины. Грубо говоря, поверхность картины состоит из краски и рисунка. Каждая из составных частей может быть основным средством выражения идей автора. Форма может быть невыявленной, подчеркнутой, искаженной и т. п. Форму может подчеркнуть фактура. При больших площадях картины с явно выраженной фактурой она воспринимается как плоская поверхность. Цвет — только инструмент для создания желаемого эффекта постольку, поскольку в наличии имеется форма.

Цвет и форма

Итак, поскольку цвет подчинен форме, совсем не обязательно, чтобы на картине (при условии, что последняя не просто копия натуры) все цвета были точно такими же, как в натуре. По наблюдениям Поупа [69], цвет в живописи обусловлен логичностью,

а не буквальным соответствием действительности. Красный цвет может незаметно переходить в желтый или в какой-либо другой так же, как и все остальные цвета могут незаметно переходить в другие. Благодаря этому картина способна создать впечатление намеренного единства, удовлетворяющего чувству эстетики точной передачей каждого оттенка психофизической реакции художника на предмет. Художник создает что-то новое, интересное, называемое «картиной», достойное того, чтобы быть замеченным.

Как видно из нашего обсуждения, мы далеко отошли от точки зрения, принятой при разборе вопроса о цвете в фотографии, так как фотограф в своей работе обязательно опирается на действительные цвета предметов. Однако цветопередача не является жизненно важной частью фотографии. Мы уже говорили, что при субтрактивном смешении цветов результат в значительной степени зависит от селективных свойств поверхностей. Инициативный фотограф может выгодно использовать все связанные с этим возможности. Картина, является ли она произведением живописи или репродукцией,— это новое произведение, предназначенное для того, чтобы доставлять определенное эстетическое наслаждение зрителю. Картина, в которой переданы широта взглядов, способность проникать в сущность предметов и знание жизни, может произвести впечатление, значительно более сильное, чем та, которая является лишь точной копией натуры.

Цвет и чувство

Цвет может быть использован как средство для сообщения картине тех же свойств, какими, по мнению художника, обладает изображаемый объект и которые связаны скорее с восприятием художника, чем с объектом, как таковым. Таким образом, правильное использование цвета (и формы) может сделать картину мрачной, яркой, веселой, меланхолической и т. д. Индивидуальность, непосредственность или сложность натуры художника, вдохновенность или прозаичность его работы и многие другие свойства характера художника оказывают непосредственное влияние на то, как будут распределены краски на картине, какой общий тон — синий, оранжевый или красный — он предпочтет, как будут краски на различных участках картины противопоставлены друг другу, а также какие предметы, формы и очертания будут выбраны[1].

Следовательно, цвет в живописи — это помощник художника в его работе, а не просто отражение свойств изображаемых предметов.

[1] Столь широкая субъективная интерпретация действительности, разумеется, не совместима с задачами реалистического искусства, объективно правильно отображающего действительность.— *Прим. ред.*

Цвет и декоративные задачи

При решении задач декоративного порядка цвет тоже является в известном смысле средством передачи настроения. Однако тот, кто определяет цвета и их распределение в декоративных целях, прежде всего думает о том, чтобы они привлекали к себе внимание. Привлекательность не является обязательным атрибутом произведения искусства, но декоративные элементы обязательно должны добавлять что-то к обстановке, делать ее более уютной или радостной.

В декоративном оформлении можно непосредственно рассматривать цвет предмета и его влияние на восприятие наблюдателя. Использование цвета в данном случае преследует единственную цель — произвести определенное впечатление на наблюдателя.

Основной принцип использования цвета в декоративных целях заключается в единстве цветовой схемы. Картина в целом как декоративный элемент или декорированная поверхность, какова бы ни была ее природа, должна доставлять удовольствие гармоничным единством цветов, соответствующих друг другу.

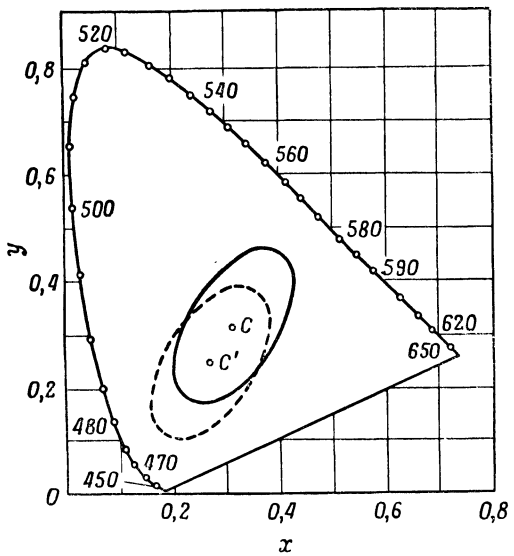
Три достаточно очевидных фактора являются преобладающими в определении успеха или неудачи цветовой схемы. Это — основной цвет, взаимоотношение или диапазон всех использованных цветов и относительные площади цветов. Очевидно, для того чтобы создать цветовое единство, необходимо достичь тесной взаимосвязи этих переменных. Мы можем обсудить эти факторы отдельно и посмотреть, какую роль они играют.

Доминирующий цвет

Доминирующий цвет цветовой схемы не требует выяснений: его наличие очевидно любому, кто возьмет на себя труд взглянуть на картину. Цветовая схема может иметь доминирующий цвет — синий, зеленый, красный и т. д. Войдя в помещение, окрашенное по схеме доминирующим цветом, не занимающийся цветом наблюдатель сразу же почувствует в окраске определенную тенденцию к единству, даже если он и не старается определить причину этого ощущения. Точно так же он почувствует, что картина с таким доминирующим тоном или цветом имеет определенный характер. Однако если он не поймет, что цвет является инструментом, создающим этот характер, он просто воспримет картину как произведение, вызывающее то или иное чувство или обладающее тем или иным тоном.

Зная, что цветовая схема существует и что имеется доминирующий цвет, даже и не видя его, человек, занимающийся изучением цвета, может прийти к заключению, что этот преобладающий цвет есть цвет большей части ее поверхности. Однако это на самом деле не

так. Иногда цвет поверхностей, составляющих лишь небольшой процент общей поверхности помещения или картины, может восприниматься как доминирующий, при условии что все цвета картины (помещения) сдвинуты в сторону какого-либо оттенка. Предположим, например, что доминирующий цвет должен быть синим и что при первом взгляде на картину (помещение) это должно бросаться в глаза. Независимо от того, в какие цвета окрашены поверх-



Ф и г. 20. 1. Явление смещения цветового баланса или доминирующего цвета в сторону синего.

ности, если все они сдвинуты в сторону синего, цветовая схема будет синей. В этом случае красный цвет, например, будет сдвинут в сторону пурпурного, оранжевый — в сторону красного, желтый — в сторону зеленого, а синий будет более густым. Если у синего цвета будет какой-либо иной оттенок, он сольется с остальными цветами. Синий оттенок не заметен ни в зелено-желтой краске, ни в красновато-оранжевой, и все же даже абсолютно нетренированный глаз почувствует направленность цветов к синему, а не к желтому. На фиг. 20.1 продемонстрировано это явление, выраженное на цветовом графике системы МКО. Представим себе, что все цвета некоторой сцены заключены в обозначенном сплошной линией эллипсе, расположенном вокруг точки осветителя *C*. Допустим, что каждый из этих цветов воспроизведен цветом, соответствующим ему и связанным с остальными цветами, и включен в эллипс, обозначенный пунктиром, который сдвинут в сторону более синих цветов. Наблю-

датель будет видеть те же цвета, что и раньше, но с легким (или сильным) оттенком синего. Он увидит, во-первых, что синих цветов стало больше и, во-вторых, что все остальные цвета приобрели синеватый оттенок. Это впечатление во многих случаях настолько сильно, что даже те поверхности, которые должны были бы зрительно восприниматься как нейтральные, окажутся сильно сдвинутыми в сторону синего цвета, а цвет, который сам по себе следовало бы назвать синим, на фоне белого будет восприниматься как чисто белый или серый.

В цветной фотографии этот общий цветовой тон фотоснимка известен как цветовой баланс. Если цветовой сдвиг сделан в правильном направлении, снимок будет удачным, если в неправильном, снимок может быть существенно испорчен. В любом случае цветовой баланс будет влиять на реакцию наблюдателя. В живописи придание картине общего цветового тона — это почти обязательный прием, к которому прибегает художник. В картинной галерее мало найдется картин, у которых не было бы общего цветового тона. Обычно он бывает желтым и не только потому, что часто картина приобретает желтоватый оттенок из-за того, что со временем желтеет лак, которым она покрыта, но и потому, что мастера часто специально прибегают к использованию общего желтоватого тона для своих произведений. В декоративных целях тоже пользуются доминирующим тоном; но часто из-за того, что это делается неумело, результат бывает неудовлетворительным. Синяя комната, декорированная исключительно в синие цвета, хотя с точки зрения декоратора и создает сильное впечатление, даже самому невзыскательному наблюдателю покажется слишком синей, и никакие «штрихи» красного, желтого, оранжевого или какого-либо иного цвета не спасут ее от гнетущей монотонности. С другой стороны, комната может показаться синей, несмотря на то что окраска большей части ее поверхности не выходит за пределы сине-зеленых тонов, при условии что все желтые и желтоватые оттенки в достаточной степени приглушены. Таким образом, доминирующий тон и соответствующее приглушение цветов, дополняющих его, вызывают у наблюдателя чувство определенного единства схемы декорирования.

Ограниченный цветовой диапазон

Хотя цветовой баланс, возможно, и является наиболее обычной из цветовых схем, она далеко не единственная. Предположим, что, вместо того чтобы ограничивать все тона или сдвигать их в определенном направлении, мы намереваемся придать картине, комнате или какой-либо наблюдаемой сцене атмосферу света и изящества, мрачности или спокойствия. В данном случае ощущение единства может быть достигнуто путем ограничения величин яркости

независимо от цветности. Например, картина и помещение, все поверхности которых имеют коэффициент отражения не ниже 40%, будут выглядеть светлыми, воздушными и неглубокими.

Если же их коэффициент отражения не превышает 10%, за исключением, может быть, относительно небольших поверхностей, предназначенных для того, чтобы снять впечатление общей темноты, картина и помещение будут выглядеть темными и, возможно, мрачными независимо от того, каков будет цветовой тон или насыщенность цветов.

Следовательно, средняя отражательная способность или величина общего светлотного уровня объекта является одним из элементов ощущаемого единства и в данном случае играет основную роль. Конечно, как мы увидим, общий результат в какой-то степени зависит от тона или насыщенности цветов, или от соотношения цветов поверхностей. Ограничение величин цветового диапазона — это один из факторов, определяющих возможность достижения единства. Комната, выдержанная в темных насыщенных цветах, выглядит богато, особенно при удачном расположении поверхностей и выборе драпировок. Помещение, в котором преобладают светлые цвета слабой насыщенности, кажется светлым и чистым, особенно при ограниченном цветовом диапазоне. С другой стороны, помещение, окрашенное в насыщенные цвета с высокой отражательной способностью, выглядит веселым, а помещение, декорированное в темных тонах низкой насыщенности,— мрачным и удручающим. В любом случае обязательно превалирует то или иное настроение или чувство, которое создается простым ограничением светлотного диапазона в соединении с эффектом, создаваемым тоном и насыщенностью цветов.

Исходя из представлений о цветовом теле (т. е. трехмерного представления всех возможных цветов вдоль осей — цветовой тон, насыщенность и светлота), цветовое единство достигается путем ограничения цветов какой-то определенной областью в пределах цветового тела. Иначе говоря (и, возможно, ошибочно), необходимо только, чтобы определенные области из возможного цветового диапазона при зрительном восприятии опускались, благодаря чему создавалось бы ощущение цветового единства воспринимаемых цветов. Эти области могут быть белыми или черными, могут иметь высокую или низкую насыщенность и любую цветность. Тогда создается впечатление, что оставшиеся области образуют единство.

Соотношение цветовых площадей

Говоря об ограниченной цветовой гамме и о доминирующем тоне, необходимо упомянуть и о роли соотношения цветовых площадей в восприятии объекта. Указывалось, что для восприятия цвета как

доминирующего совсем не обязательно (хотя часто бывает именно так), чтобы бóльшая часть площади объекта имела этот цвет. Обнаружено, что эффектность цвета поверхности — это чрезвычайно сложное явление, которое трудно оценить и сравнить с другими свойствами поверхности. Эта эффектность, которая, согласно Поупу, может быть названа также привлекательностью, зависит от цветового тона, насыщенности и светлоты цвета с учетом занимаемой им площади. Мы будем рассматривать более подробно этот вопрос в следующей главе, так как он очень важен с точки зрения гармонии цветов. Однако в общих словах его можно объяснить следующим образом. Привлекательность прежде всего основана на контрасте, который создается разницей в каких-либо свойствах цвета. Разница в светлоте — это, пожалуй, наиболее резкий тип контраста, но и разница в насыщенности может оказаться столь же существенной. Разница в цветовом тоне обычно не столь эффективна и меньше всего влияет на контраст цветовых различий, обусловленных строением поверхности и т. п. Разница в светлоте и насыщенности цветов переднего плана и фона прежде всего определяет привлекательность, особенно если к ней еще добавляется большое тоновое различие этих цветов.

Все описанные выше явления зависят от относительной площади, занимаемой данным цветом. Если относительная площадь, отведенная одному цвету, увеличивается, повышается вероятность того, что этот цвет будет бросаться в глаза прежде всего. Если цвет очень насыщен и ярок, совсем необязательно, чтобы площадь, которую он занимает, составляла значительную часть общей площади объекта: и без того этот цвет может стать преобладающим и влиять на восприятие других цветов. Здесь мы, однако, должны сказать о том, что необходимо отличать цвет фона от цвета переднего плана. Если ставится цель определить с научной точки зрения свойства поверхности, благодаря которым эта поверхность воспринимается как фон, то при этом обязательно приходится затрагивать вопросы психологии, так как при одних и тех же условиях одна и та же поверхность может зрительно восприниматься то как фон, то как план. Однако в обычных условиях тот цвет, который воспринимается как фон, занимает бóльшую площадь и *окружает* меньшие поверхности. Он может привлекать к себе основное внимание и, наоборот, может быть почти незаметен для нетренированного наблюдателя. Но даже во втором случае этот цвет является основой, на фоне которой видны остальные цвета. Если фон темный, остальные цвета будут между собой больше контрастировать, если фон светлый — меньше.

Возвращаясь к вопросу об единстве восприятия цветов, скажем, что оно может быть достигнуто лишь в том случае, если все цвета при данных занимаемых ими площадях обладают приблизительно одинаковой *степенью* привлекательности. Таким обра-

зом, наиболее сильные цвета могут применяться вместе со значительно более слабыми, если их относительная площадь невелика. При правильном соотношении площадей сильный цвет будет сочетаться с остальными (менее сильными) таким образом, что будет дополнять цветовое единство, а не нарушать его. Однако в известном смысле эта характеристика цветовой площади не относится к цвету, определенно воспринимаемому как фон. Площадь фонового цвета воспринимается не столько по отношению к площадям других (отдельно взятых) цветов, сколько по отношению ко всем площадям в целом. Единство ощущается и в том случае, когда все цвета переднего плана находятся в одинаковом соотношении с цветом фона, даже несмотря на то, что такая же площадь фонового цвета могла бы серьезно нарушить единство, если бы она сама зрительно воспринималась как объект переднего плана. Таким образом, фон как бы противопоставляется другим цветам и может, так сказать, собрать их, если он одинаково противопоставлен каждому цвету и если его площадь находится в соответствующем соотношении с площадью всего объекта.

Равенство привлекательности

Итак, все основные факторы, определяющие степень привлекательности цвета, относительны и могут быть определены как относительный цветовой тон, относительная светлота, относительная насыщенность и относительная площадь. Чем больше контраст по любому из этих свойств, тем больше разница в привлекательности, и любое отдельное свойство или группа свойств может быть так подобрана к другим, чтобы создавалась равномерность привлекательности. В этом отношении любые цвета можно так скомбинировать, чтобы они образовывали цветовую схему, в которой наблюдатель обнаружит тот или иной вид единства. Это единство, это ощущение того, что цвета «подходят» друг к другу, вероятно, и есть основа декоративности независимо от того, имеет ли она какое-либо отношение к живописи или нет.

ГЛАВА XXI

Гармония цветовых пар

Принципы цветовой гармонии, установленные Поупом и изложенные в предыдущей главе, представляют собой общие закономерности, приложимые к живописи, отделке интерьеров и собственно рисунку[1]. Однако, когда мы подходим к вопросу о сходстве или различии отдельных цветов, мы сталкиваемся с несколько другими факторами, даже если комбинации цветов испытываются как отдельные пары с приблизительно одинаковой площадью. Для удобства в дальнейшем примеры двухцветного изображениия и цветов в пáрах будут нами рассмотрены совместно.

Эстетическая оценка двухцветных сочетаний

Когда в поле зрения имеются только два цвета, каждый из них неизбежно рассматривается по отношению к другому. Любое эстетическое заключение будет зависеть от сходства и различия между этими двумя цветами, так же как и от собственной характеристики каждого из них. Дополнительно будут играть роль некоторые зрительные явления, причем в более сильной степени, чем это было бы при большом количестве цветов, рассматриваемых одновременно.

Сходство в цветовых пáрах

Цвета могут быть схожи в любом из трех своих показателей, т. е. они могут быть приблизительно одинаковыми по цветовому тону, насыщенности или светлоте. Принимая, что площадь и фактура поверхности приблизительно одинаковы, указанные три переменные являются единственными, которые можно сравнивать. Так как пара цветов может быть одинакова или различна в отношении любой из этих трех переменных, имеются восемь возможностей сходства и различия, которые могут быть рассмотрены систематически. Сначала, однако, стоит вообще рассмотреть обстановку, в которой

---

[1] Под «собственно рисунком» автор в этом случае подразумевает воспроизведение и выявление формы изображаемых объектов.— *Прим. ред.*

производится наблюдение, и отметить различные явления, играющие соответствующую роль в любом благоприятном или неблагоприятном заключении о цветовой комбинации.

Предположим, что мы имеем два цветных образца равной площади, помещенных впритык друг к другу, и предположим для определенности, что они представляют собой квадраты окрашенной бумаги со стороной 5—8 *см* с одинаковой матовой бесструктурной поверхностью. Такие образцы наблюдатель должен видеть на каком-то фоне, поскольку полный угловой размер его поля зрения намного больше, чем участок, занятый образцами, даже если положение глаз зафиксировано. Всякое сравнение двух относительно малых участков автоматически включает в себя третий участок (окружение), который может быть назван фоном. Важность фона показана в большом числе работ, выполненных в этой области. Фон является обычно фактором, который определяет состояние зрения наблюдателя во время испытания, при этом действие фона может быть как отрицательным, так и положительным. В отношении яркости двумя крайними случаями будут, конечно, фоны черный и белый. Эти крайние случаи соответствуют положениям, при которых условия ви́дения определяются соответственно или полностью самими образцами (при черном фоне), или в значительной степени одним фоном (при белом фоне). Важность фона для эстетической оценки будет очевидна, если представить себе, что при черном фоне только более темный из двух образцов может выглядеть как бы содержащим серый цвет, в то время как при белом фоне оба образца могут выглядеть сероватыми, причем в большей степени. Световая адаптация зрения будет соответствовать, в зависимости от соотношения площадей и яркостей образцов и фона, некоторому уровню, лежащему между яркостью образцов и яркостью фона.

Если фон обладает еще и определенным цветовым тоном, это также оказывает влияние на условия ви́дения и, следовательно, на воспринимаемые цвета обоих образцов. Поскольку этот случай является в сущности уже комбинацией трех цветов, подобный пример мы здесь рассматривать не будем, за исключением вопроса о влиянии цветности осветителя. Вообще говоря, воздействие цветного фона было бы аналогично действию соответствующего цвета при трехцветных сочетаниях образцов, но влияние его было бы более сильным.

Поскольку площади и фактура двух поверхностей приняты нами одинаковыми, причем площади эти все же достаточно велики, чтобы не могла сказываться разница из-за фокусировки глаз, остаются только три цветовых показателя — цветовой тон, насыщенность и яркость — в качестве переменных, влияющих на заключение наблюдателя о гармонии между двумя цветами или об ее отсутствии.

Неизвестно, в какой степени сходство или различие цветов влияет на заключение о гармонии, но установлено, что глаз распознаёт сходство цветов по всем трем показателям, и это должно неизбежно играть значительную роль в результирующей оценке. Существуют семь вариантов сходства (подобия) пáры цветов. Кроме того, могут быть одинаковы все три показателя, и тогда оба цвета будут просто тождественны другу другу. Если же удовлетворяется любой из упомянутых семи вариантов, то цвета будут выглядеть имеющими нечто общее. В каждом из трех возможных случаев, в которых цвета на обоих участках отличаются только по одному показателю, будет ощущаться сильное сходство, степень которого будет зависеть, в частности, от рода данного показателя и от степени его различия. Однако различия в цветовом тоне, насыщенности и яркости не равноценны и не могут сравниваться друг с другом непосредственно. Каждое из них будет иметь свое специфическое воздействие на наблюдателя, и, по-видимому, каждый человек будет реагировать на них с эстетической точки зрения по-своему.

К сожалению, в этой области нет достаточного количества работ для того, чтобы установить относительную важность каждой из указанных переменных для выбора наблюдателем наиболее гармоничных цветовых сочетаний. Существует еще и другой фактор, влияющий на оценку комбинаций наблюдателем и играющий столь важную роль, что он может оказаться в отдельных случаях решающим. В каждом конкретном случае этот фактор должен учитываться при оценке ситуации. Этот фактор заключается в смещении, изменении внешнего вида одного цветного участка, когда он рассматривается непосредственно после другого. Это явление будет нами рассмотрено несколько более детально как вследствие его возможного значения для выбора пáрных цветовых комбинаций с позиций эстетических требований, так и вследствие его важности для понимания зрительного процесса при рассматривании цветовой пары.

Цветовые сдвиги

Пусть два цветных образца помещены на совершенно черном фоне и наблюдателю требуется решить, образуют ли эти два цвета приятное сочетание. Глядя на образцы, чтобы сделать свой выбор, наблюдатель может идти любым из возможных путей или любыми комбинациями различных путей зрительной оценки пары. Например, он может поочередно смотреть на центральные участки обоих образцов, может вместо этого смотреть на линию раздела между образцами, может посмотреть на один образец, затем на черный фон и затем на другой образец, и, наконец, он может смотреть на черное окружение и видеть цветные поля, как говорится, уголком глаза.

Если нет предопределяющих условий, наблюдатель может наудачу воспользоваться любым из описанных способов с равной вероятностью. Наблюдения приводят, однако, к определенному выводу, что действия наблюдателя обдуманы, хотя он сам зачастую этого не подозревает. Безрассудно, конечно, пытаться описать причины неосознанных действий, так как при этом слишком легко выдумать доводы в поддержку той или иной теории. Однако есть некоторое основание считать, что наблюдатель выполняет указанные выше различные действия потому, что образцы действительно изменяют свой вид в каждом из этих случаев, и он начинает тренироваться и отрабатывать этот процесс опробования всех способов для вынесения окончательного решения. Во всяком случае, внешний вид образцов при различных способах наблюдения действительно изменяется. Если смотреть недолго прямо на один из окрашенных образцов, а затем — на другой, то по крайней мере в первые мгновенья второй образец будет рассматриваться глазами, частично адаптированными к цвету первого образца. Это же справедливо для случая, когда сначала рассматривается второй образец или фон.

Такая, так сказать, последовательная адаптация участвует в оценке и цветностей, и яркостей. Предположим, что последнее наблюдавшееся поле было темно-зеленым. Зрение наблюдателя будет иметь тенденцию к увеличению общей чувствительности, потому что образец был темным, и к увеличению чувствительности сине-чувствительного и красно-чувствительного приемников в большей степени, чем зелено-чувствительного. При внезапном переводе взгляда на какой-либо другой образец он будет восприниматься несколько более ярким и менее зеленым вследствие указанного состояния зрения. Если, например, этот образец среднего желтого цвета, он будет выглядеть более светлым и более оранжевым. Противоположное смещение происходит в направлении от среднего желтого к более зеленому, когда чувствительность «синего» приемника относительно возрастает, а общая чувствительность несколько понижается. Если сначала смотреть на принятый нами черный фон, то общая чувствительность будет просто увеличиваться и любой образец, на который мы затем посмотрим, будет казаться посветлевшим. Если зрение ограничено линией раздела образцов или если взгляд перемещается быстро с одного образца на другой и обратно, устанавливается стабильное состояние, в котором зрение стремится адаптироваться на оба цвета, особенно, если наблюдатель смотрит на образцы достаточно долго. Такое положение было рассмотрено Джаддом [36].

Мы можем теперь кратко изложить причину наблюдаемых цветовых различий применительно к случаю черного фона. Обращаясь к трехкомпонентной теории зрения и говоря в самых общих выражениях, мы нашли, что если первый рассматриваемый образец вызывает соотношение возбуждений трех приемников, совер-

шенно отличное от соотношения, вызываемого вторым, то, весьма вероятно, второй образец будет восприниматься имеющим совершенно иной цветовой тон по сравнению с тем, какой он имел бы при рассматривании образцов в обратном порядке. Это смещение, изменение цветового тона, сопровождается также в общем случае изменением насыщенности, зависящим от близости возбуждений приемников для обоих сравниваемых образцов. Существуют два крайних случая, по отношению к которым все остальные являются промежуточными. Если оба образца тождественны по цвету, то никакого сдвига цветового тона или насыщенности происходить не будет. Если цвета являются взаимно-дополнительными, т. е. если один из них возбуждает приемники в соотношении, обратном по сравнению с другим, то будет наблюдаться лишь изменение насыщенности без смещения цветового тона. При одинаковой яркости обоих образцов смещение тона совсем не будет происходить, если цветовые тона образцов являются взаимно-дополнительными, или оно будет незначительным, если образцы близки по цветовому тону. В этом последнем случае будет наблюдаться большее или меньшее смещение цветового тона в зависимости от степени различия.

Большую роль в этом смещении цветового тона играет также относительная яркость. Если один образец светлый, а другой темный, то даже при равенстве их цветовых тонов будет проявляться тенденция к смещению цветового тона, вызываемая различием яркости; в результате даже совершенно одинаковые поверхности будут при различной относительной яркости выглядеть в общем отличающимися по цвету.

Крайне необходимо тщательно проследить схему всех этих сдвигов. Очевидно, что воспринимаемые цветовой тон, насыщенность и светлота будут изменяться в зависимости от последовательности и порядка наблюдений. Не будет чем-то особенным предположение, что здесь имеется такое *непостоянство видимого цветового тона*, которое делает одно сочетание цветов неудачным, а другое — гармоничным. Если это положение можно считать обоснованным, то оно может привести к тому, что два цвета будут выглядеть негармонирующими, когда наблюдатель при переводе взгляда с A на B и затем снова на A будет видеть цветовой тон образца A неодинаковым. Причина этой негармоничности (если указанное положение справедливо) может заключаться в том, что противоположные смещения цвета вызывают чувство неуверенности в истинных цветах образцов.

Интересно заметить, что такое положение могло бы привести к одному из более или менее распространенных общих принципов гармонии, заключающемуся в том, что наиболее приятные сочетания образуются цветами, близкими друг к другу по цветовому тону, а также являющимися взаимно-дополнительными.

Независимо от того, являются ли описанные смещения цветового тона веским эстетическим критерием, они действительно вызывают у наблюдателя сомнение и создают неуверенность в отношении истинного цвета данной поверхности.

Действие фона

Прежде чем перейти к фонам белого и серого цвета, необходимо рассмотреть еще один важный фактор применительно к образцам на черном фоне. Когда образцы видны на фоне черного, адаптация должна определяться только самими образцами. Цветность освещающего источника играет при этом иную роль, чем в повседневной жизни. В обычных условиях при изменениях условий освещения имеют место значительные изменения цвета объектов и зрение стремится путем адаптации прийти к такому состоянию, при котором освещение будет всегда восприниматься белым. В этом случае может иметь место также «вычитание» цвета освещения из цвета поверхности освещаемых объектов. Соответственно поверхность, выглядящая желтой при искусственном освещении и при зрении, адаптированном на дневной свет, будет, возможно, выглядеть голубой при адаптации зрения на искусственное освещение. Однако образцы на черном фоне могут рассматриваться при любом искусственном освещении, т.е. при различных источниках света, включая цветные, причем действительный результат будет отчасти зависеть и от условий, в которых зрение находилось незадолго до этого (от недавней «истории» зрения). Добавление (при цветном освещении) одного и того же цвета к обоим сочетаемым образцам может значительно сблизить их по цветовому тону и таким образом заметно воздействовать на выбор сочетаний по сравнению с тем выбором, который был бы сделан при дневном свете.

Если образцы рассматриваются на большом сером фоне с яркостью, одинаковой с ними, промежуточной, или, наконец, сравнимой с ними, будет проявляться тенденция к более полной адаптации *на цвет освещения* и влияние фона будет отчасти исключено. Наличие фона такой яркости вызывает, однако, другой эффект, природа которого еще точно не установлена. Цвет значительно изменяется по насыщенности, когда его рассматривают на белом или черном фоне. Имеются, однако, некоторые указания на то, что насыщенность оказывается максимальной, когда цвет рассматривают на сером фоне такой же яркости. Действительно, образец очень светлый и очень темный по сравнению с фоном выглядит менее насыщенным, чем образец, совпадающий по яркости с окружающим его фоном, хотя его физические характеристики были неизменными во всех случаях. Далее, если яркость фона промежуточная между яркостями двух образцов, то яркостное различие между образцами будет казаться

преувеличенным. Это явление, как и предыдущее, просто равноценно введению новой пары цветов взамен прежней. Влияние белого фона проявляется подобным же образом: к цветам кажется добавленным серый и они становятся как бы новой парой с другими показателями, требующими заново рассмотреть вопрос об их гармоничности.

Изложенное выше может быть сформулировано следующим образом. На результаты наших эстетических выводов о цветовой гармонии данной пары цветов оказывают значительное влияние вариации условий наблюдения, в результате чего одни и те же цвета в одной обстановке кажутся одними, в другой — другими. Выбор гармонирующей пары может иногда основываться на таких явлениях, как, например, изменчивость цветового тона в зависимости от способов наблюдения образцов. Особенно большая осторожность должна соблюдаться при подборе цветов, если его результаты будут применяться далее к другим условиям и другим наблюдателям. Этот род неопределенности возможен точно так же, как вариации вкуса наблюдателей, делающие такие исследования столь отличающимися одно от другого. Примеры того, как образцы могут изменяться по всем трем цветовым показателям в зависимости от условий, приведены в статье Джадда [36]. Осознанное цветовое сходство и отсутствие смещений, вызывающих неуверенность в цветовом тоне, могут являться решающими факторами при эстетическом выборе цветовых сочетаний. Приложимость сделанного выбора к другим условиям будет зависеть от того, в какой степени цвета выглядят одинаково в различных вариантах этих условий.

Приведенное здесь рассмотрение является, конечно, теоретическим, сделанным безотносительно к тому индивидуальному предпочтению, которое каждый конкретный наблюдатель отдает одним цветам перед другими. На основании имеющихся литературных данных относительно экспериментов по эстетическому выбору *одиночных цветов* можно сделать заключение, что такой выбор практически не определенный. Вопрос о том, можно ли судить об эстетических качествах одиночного цвета без хотя бы мысленного сравнения его с другими цветами, остается открытым. Не было ни одного случая, чтобы два сходных эксперимента по эстетической оценке одиночных цветов дали достаточно схожие результаты; так что имеются веские основания для обсуждения этого вопроса.

Влияние площади и фактуры поверхности

При рассмотрении двух одновременно представленных цветных участков принималось, что они имеют, во-первых, одинаковую площадь и, во-вторых, идентичную фактуру поверхности.

Теперь необходимо кратко рассмотреть эти два фактора, хотя, как и раньше, следует заметить, что имеется так мало количественных данных по этому вопросу, что здесь возможны только предположительные замечания. В отношении последнего фактора — различия фактуры поверхностей — может быть, по-видимому, сделано лишь одно заключение, что, если фактура двух поверхностей очень различна, нельзя непосредственно сравнивать их цвет. Большое различие в фактуре поверхностей может так изменить внешний вид образцов, что даже при объективном равенстве их цветов только эксперт в состоянии решить, тождественны ли они по цвету, причем порой он должен будет применять для сравнения другие подходящие цветные образцы, слегка отклоняющиеся от тождества.

В отношении первого фактора — влияния относительной площади — проведено намного больше исследований и сделано, по-видимому (например, Бредли [8]), некоторое приближение к закономерностям выбора. Здесь, однако, мы отметим неожиданный факт, что, поскольку относительную площадь можно изменять в достаточно широких пределах, почти *любые два* цвета (при соответствующем соотношении площадей) могут выглядеть гармоничными. Изменение относительной площади может изменить любую закономерность, установленную для цветовых пар с равными площадями. Имеются указания, что с помощью соответствующего регулирования относительных площадей, по-видимому, любые цвета могут быть скомбинированы для получения гармонических сочетаний. Такой результат связан, однако, не только с относительной, но и с абсолютной видимой площадью как с необходимым инградиентом, вследствие чего подобранная комбинация будет выглядеть гармоничной только с данного расстояния.

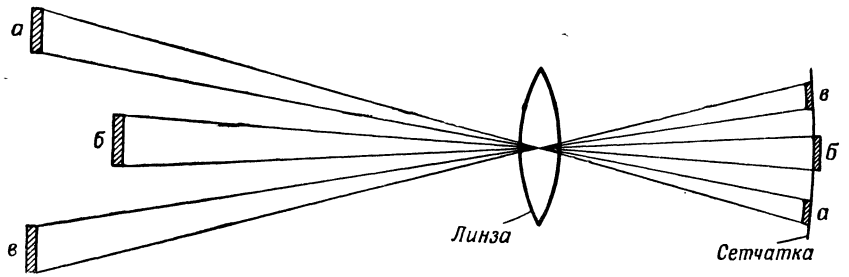
Представляется несомненным, что в основе эстетического выбора цветовых гармоний лежат вполне определенные основные принципы, и представляется возможной, наконец, некоторая степень согласия в действительном выборе и установлении гармонических сочетаний. Однако при любых экспериментах, проводимых в этой области для установления широких обобщений, следует преодолеть ряд распространенных в настоящее время заблуждений [1].

---

[1] Автор подходит к вопросу цветовых гармоний односторонне, рассматривая пары изолированных цветов, не связывая цвета с их предметным либо изобразительным значением, не учитывая ряда других важных в данном вопросе его сторон, наконец, понимая под гармоничностью сочетаний красивость или приятность их, что составляет лишь один из возможных аспектов рассмотрения проблемы гармоничности. Высказываемые в этой главе соображения интересны и в большинстве своем справедливы, однако они имеют частное значение и ни в коей мере не дают полного решения проблемы.— *Прим. ред.*

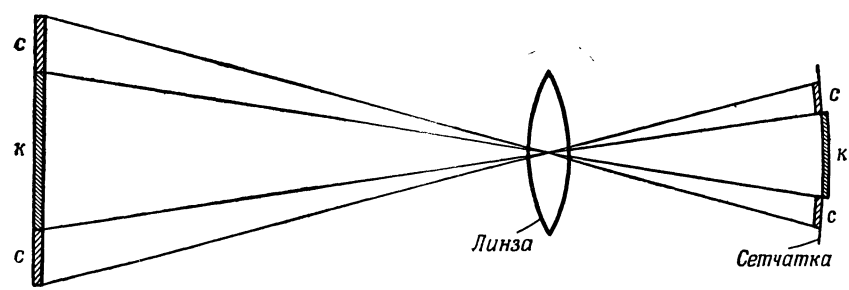
Выступающие и отступающие цвета

Еще одно явление, скорее оптического характера, проявляется иногда с большой наглядностью в тех случаях, когда два или более цветов скомбинированы в каком-либо изображении или когда два цвета в любых условиях расположены вплотную друг к другу. Это явление заключается в кажущемся отделении цветных участков друг от друга, причем они воспринимаются расположенными в разных плоскостях. Происходит это, по-видимому, в результате раз-



Фиг. 21.1. Свет от более удаленных объектов образует в глазу сфокусированные изображения ближе к хрусталику (линзе), чем свет того же цвета от более близких объектов.

личия фокусных расстояний глаза для разных цветов, хотя и другие факторы также оказывают здесь некоторое влияние. Природа этого явления может быть пояснена фиг. 21.1 и 21.2. На фиг. 21.1 объекты *а* и *в* находятся на более далеком расстоянии от глаза, чем объект *б*. Если принять, что все три объекта отражают одинаковый монохроматический свет, глаз сфокусирует световые лучи от объектов *а* и *в* ближе к хрусталику, чем от объекта *б*. Эта разница делает



Фиг. 21.2. Свет от синих объектов образует в глазу сфокусированные изображения ближе к хрусталику (линзе), чем свет от красных объектов, расположенных в той же плоскости.

возможным правильное восприятие действительного положения объектов *а*, *б* и *в* относительно друг друга. На фиг. 21.2 показаны три объекта, расположенных в одной плоскости, но имеющих разный цвет: красный (*к*) и синий (*с*). Вследствие хроматической аберрации хрусталика синий сфокусируется ближе к нему, чем красный, и эта разница вызовет восприятие, подобное тому, которое вызывалось относительным расположением одноцветных изображений на фиг. 21.1. Однако в этом случае восприятие является, конечно, неверным. Если какие-либо факторы не сглаживают этот эффект, синие участки кажутся углубленными, а красные — выступающими вперед по отношению к воспринимаемой плоскости их фактического положения.

Литература

1. Abney W. W., Researches in Colour Vision and the Trichromatic Theory, Longmans, Green and Co., Lnd., 1913, pp. 418.
2. Ames A., Jr., «Depth in Pictorial Art», *The Art Bulletin*, 8, 4—24 (1925).
3. Balinkin I. A., «Industrial Color Tolerances», *The Am. J. of Psychology*, **52**, 428—448 (1939).
4. Barnes N. F., «A Spectrophotometric Study of Artists' Pigments», *Tech. Studies in the Field of the Fine Arts* (Harvard Univ.), **7**, 120—138 (1939).
5. Birren F., The Story of Color from Ancient Mysticism to Modern Science, The Crimson Press, Westport, Conn., 1941, pp. 338.
6. Boring E. G., A History of Experimental Psychology, The Century Co., N. Y., 1929, pp. 699.
7. Boring E. G., Sensation and Perception in the History of Experimental Psychology, D. Appleton-Century Co., N. Y., 1942, pp. 644.
8. Bradley M. C., Jr., «A Theory of Tone Attraction», *Tech. Studies in the Field of the Fine Arts* (Harvard Univ.), **2**, 2—10 (1933).
9. Brunswik E., «Zur Entwicklung der Albedowahrnehmung», *Z. fur Psychologie*, **109**, 40—115 (1929).
10. Burton E. F., Smith M. A., The Physical Properties of Colloidal Solutions, 3rd ed., Longmans, Green and Co., Lnd., 1938, pp. 235.
11. Cady F. E., Dates H. B., Illuminating Engineering, 2nd ed., Wiley, N. Y., 1928, pp. 515.
12. Chevreul M. E., The Principles of Harmony and Contrast of Colours, Longman, Brown, Green and Longmans, Lnd., 1854, pp. 431.
13. Committee on Colorimetry, «Colorimetry Report», *J. of the Opt. Soc. of America*, **33**, 544—554 (1943); **34**, 183—218, 245—266, 633—688 (1944); **35**, 1—25 (1945).
14. Cutler C. G., Pepper S. C., Modern Color, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1923, pp. 163.
15. Eastman Kodak Co., Wratten Light Filters, 17th ed., Eastman Kodak Co., Rochester, N. Y., 1945, pp. 86.
16. Edwards E. A., Duntley S. Q., «The Pigments and Color of Living Human Skin», *The Am. J. of Anatomy*, **65**, 1—33 (1939).
17. Evans R. M., «Visual Processes and Color Photography», *J. of. the Opt. Soc. of America*, **33**, 579—614 (1943).

18. Evans R. M., Klute J., «Brightness Constancy in Photographic Reproductions», *J. of. the Opt. Soc. of America*, **34**, 533—540 (1944).
19. Foss C. E., Nickerson D., Granville W. C., «Analysis of the Ostwald Color System», *J. of the Opt. Soc. of America*, **34**, 361—381 (1944).
20. Gelb A., «Die Farbenkonstanz der Sehdinge», *Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie*, **12**, 594—678 (1929).
21. Gettens R. J., Stout G. L., Painting Materials, D. Van Nostrand Co., N. Y., 1942, pp. 333.
22. Gibson K. S., Tyndall E. P. T., «Visibility of Radiant Energy», *Scientific Papers of the Bureau of Standards*, **19**, 131—191 (1925).
23. Hardy A. C., Wurzburg F. L., Jr., «The Theory of Three-Color Reproduction», *J. of the Opt. Soc. of America*, **27**, 227—240 (1937).
24. Helmholtz's Treatise on Physiological Optics, ed. Southall J. P. C., *The Opt. Soc. of America*, **1**, 482; **2**, 480 (1924); **3**, 736 (1925).
25. Helson H., «Fundamental Problems in Colour Vision. I. The Principle Governing Changes in Hue, Saturation and Lightness of Non-Selective Samples in Chromatic Illumination», *J. of Experimental Psychology*, **23**, 439—476 (1938).
26. Helson H., «Color Tolerances as Affected by Changes in Composition and Intensity of Illumination and Reflectance of Background», *The Am. J. of Phychology*, **52**, 406—412 (1939).
27. Helson H., Jeffers V. B., «Fundamental Problems in Color Vision. II. Hue, Lightness and Saturation of Selective Samples in Chromatic Illumination», *J. of Experimental Psychology*, **26**, 1—27 (1940).
28. Helson H., «Some Factors and Implications of Color Constancy», *J. of the Opt. Soc. of America*, **33**, 555—567 (1943).
29. Hering E., Grundzüge der Lehre von Lichtsinn, Springer, Berlin, 1920, pp. 294.
30. Hess C., Pretori H., «Messende Untersuchungen über die Gesetzmässigkeit des simultanen Helligkeits-Contrastes», *Archiv für Ophthalmologie*, **40**, 1—24 (1894).
31. International Printing Ink Corporation, Color as Light, Monograph № 2. The Research Lab. of the Internat. Printing Ink Corp., N. Y., 1935, pp. 21.
32. Judd, D. B., «A General Formula for the Computation of Colorimetric Purity», *Bureau of Standards J. of Research*, **7**, 827—841 (1931).
33. Judd D. B., «A. Maxwell Triangle Yielding Uniform Chromaticity Scales», *J. of Research of the NBS*, **14**, 41—57 (1935).
34. Judd D.B., «Specification of Color Tolerances at the NBS», *The Am. J. of Psychology*, **52**, 418—427 (1939).
35. Judd D. B., Kelly K. L., «Method of Designating Colors», *J. of Research of the NBS*, **23**, 355—385 (1939).
36. Judd D. B., «Hue, Saturation and Lightness of Surface Colors with Chromatic Illumination», *J. of the Opt. Soc. of America*, **30**, 2—32 (1940).
37. Katz D., The World of Colour, Kegan P., Trench, Trubner and Co., Lnd., 1935, pp. 300.

38. Kelly K. L., «Color Designations for Lights», *J. of Research of the NBS*, **31**, 271—278 (1943).
39. Köhler W., Dynamics in Psychology, Liveright Publ. Corp., N. Y., 1940 pp. 158.
40. Köhler W., Wallach H., «Figural After-Effects. An Investigation of Visual Processes», *Proc. of the Am. Philosophical Soc.*, 88, 269—357 (1944).
41. Köhler W., Gestalt Psychology, An Introduction to New Concepts in Modern Psychology, Liveright Publ. Co., N. Y., 1947, pp. 369.
42. Lovibond J. W., Measurement of Light and Colour Sensations, Gill G., Lnd., pp. 132.
43. Luckiesh M., Color and Its Applications, D. Van Nostrand Co., N. Y., 1915, pp. 357.
44. Luckiesh M., Visual Illusions, Their Causes, Characteristics and Applications, D. Van Nostrand Co., N. Y., 1922, pp. 252.
45. Luckiesh M., Lighting Fixtures and Lighting Effects, McGraw-Hill, N. Y., 1925, pp. 330.
46. MacAdam D. L., «Maximum Visual Efficiency of Colored Materials», *J. of the Opt. Soc. of America*, **25**, 361—367 (1935).
47. MacAdam D. L., «Subtractive Color Mixture and Color Reproduction», *J. of the Opt. Soc. of America*, 28, 466—480 (1938).
48. MacAdam D. L., «Photographic Aspects of the Theory of Three-Colour Reproduction», *The Photographic J.*, 81, 333—351 (1941).
49. MacAdam D. L., «Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight», *J. of the Opt. Soc. of America*, 32, 247—274 (1942).
50. Mack J. E., Martin M. J., The Photographic Process, McGraw-Hill, N. Y., Lnd., 1939, pp. 586.
51. MacLeod R. B., An Experimental Investigation of Brightness Constancy. Archives of Psychology, № 135 (Columbia Univ.), 1932, pp. 102.
52. Maerz A., Paul M. R., A Dictionary of Color, McGraw-Hill, N. Y., 1930, pp. 207.
53. Massachusetts Institute of Technology, the Color Measurement Laboratory. Handbook of Colorimetry. The Technology Press, Cambridge, Mass., 1936, chapt. I, III, V.
54. Mees C. E. K., Photography, 2nd ed., The Macmillan Co., N. Y., 1942, pp. 227.
55. Mees C. E. K., The Theory of the Photographic Process, The Macmillan Co., N. Y., 1942, pp. 1124.
56. Merwin H. E., «Optical Properties and Theory of Color of Pigments and Paints», Proc. of the ASTM, **17**, pt. II, 494—530 (1917).
57. Michelson A. A., Studies in Optics, The University of Chicago Press, Chicago, Ill., 1927, pp. 176.
58. Moon P., The Scientific Basis of Illuminating Engineering, McGraw-Hill, N. Y., 1936, pp. 608.
59. Morgan C. T., Physiological Psychology, McGraw-Hill, N. Y., 1943, pp. 623.

60. Morris R. H., «Metameric Formulation», *J. of the Opt. Soc. of America*, 37, 669 (1947).
61. Munsell A. H., A Color Notation, 9th ed., Munsell Color Co., Baltimore, Md., 1941, pp. 74.
62. Munsell Color Co., Munsell Book of Color, Munsell Color Co., Baltimore, Md., 1942.
63. Newhall S. M., Nickerson D., Judd D. B., «Fina lReport of the OSA. Subcommittee on the Spacing of the Munsell Colors», *J. of the Opt. Soc. of America*, **33**, 385—418 (1943).
64. Nickerson D., Color Measurement and Its Application to the Grading of Agricultural Products. Miscellaneous Publ. 580, US Department of Agriculture, 1946, pp. 62.
65. Ostwald W., Colour Science. Pt I, Colour Theory and Colour Standardisation, 1931, pp. 141. Pt. II, Applied Colour Science, Winsor and Newton, Lnd., 1933, pp. 173.
66. Parsons J. H., An Introduction to the Study o lColour Vision, 2nd ed., The University Press, Cambridge, England, 1924, pp. 323.
67. Phillipps L. M., Form and Colour, Duckworth, Lnd., 1915, pp. 294.
68. Polyak, S. L., The Retina, The University of Chicago Press, Chicago, Ill., 1941, pp. 607.
69. Pope A., An Introduction to the Language of Drawing and Painting, Harvard University Press, Cambridge, Mass., vol. 1, 1929, pp. 157; vol. 2, 1931, pp. 121.
70. Richmond L., The Technique of Oil Painting, Pitman Publ. Corp., N. Y., 1931, pp. 144.
71. Rood O. N., Students' Textbook of Color, D. Appleton and Co., N. Y., 1916, pp. 329.
72. Rood R., Color and Light in Painting, Columbia University Press, N. Y., 1941, pp. 299.
73. Schouten J. F., Visueele Meting van Adaptatie en van de wederzijdsche Beinvloeding van Netvlieselementen, Drukkerij Fa. Schotanus and Jens, Utrecht, 1937, pp. 95.
74. Sears F. W., Principles of Physics, III — Optics, 2nd ed., Addison-Wesley Press, Cambridge, Mass., 1946, pp. 323.
75. Southall J. P. C., Introduction to Physiological Optics, Oxford University Press, Lnd., 1937, pp. 426.
76. Thouless R. H., «Phenomenal Regression to the Real Object. I.», *The British J. of Psychology*, **21**, 339—359 (1931).
77. Troland L. T., The Principles of Psychophysiology, vol. 2., D. Van Nostrand, N. Y., 1930, pp. 397.
78. Vickerstaff T., «The Brightness of Present-Day Dyes», *The Prcc. of the Physical Soc. (Lnd.)*, **57**, 15—31 (1945).
79. Von Bezold W., The Theory of Color, American ed., L. Prang and Co., Boston, 1876, pp. 274.
80. Walsh J. W. T., Photometry, Constable and Co., Lnd., 1926, pp. 505.
81. Weber F. W., Artists'Pigments, D.Van Nostrand Co., N. Y., 1923, pp. 235.

82. Wood R. W., Physical Optics, 3rd ed., The Macmillan Co., N. Y., 1934, pp. 846.
83. Woodworth R. S., Experimental Psychology, Henry Holt and Co., N. Y. 1938, pp. 889.
84. Wright W. D., The Perception of Light, Chemical Publ., Co., N. Y., 1939, pp. 100.
85. Wright W. D., The Measurement of Colour, Adam Hilger, Lnd., 1944, pp. 223.
86. Wright W. D., Researches on Normal and Defective Colour Vision, The C. V. Mosby Co., St. Louis, Mo., 1947, pp. 383.
87. Zworykin V. K., Wilson E. D., Photocells and Their Application, 2nd ed., Wiley, N. Y., 1932, pp. 331.

Список дополнительной литературы

1. Алексеев С. С., Цветоведение, Изд-во «Искусство», 1952.
2. Алексеев С. С., О цвете и красках, Изд-во «Искусство», 1962.
3. Ашкенази Г. И., Цвет в природе и технике, Госэнергоиздат, 1959.
4. Гуревич М. М., Цвет и его измерение, Изд-во АН СССР, 1950.
5. Кравков С. В., Цветовое зрение, Изд-во АН СССР, 1951.
6. Кринов Е. Л., Спектральная отражательная способность природных образований, Изд-во АН СССР, 1947.
7. Майзель С. О., Трансформация лучистой энергии в сетчатке человеческого глаза, Госэнергоиздат, 1963.
8. Майзель С. О., Ратнер Е. С., Цветовые расчеты и измерения, Госэнергоиздат, 1941.
9. Мешков В. В., Основы светотехники, ч. II, Госэнергоиздат, 1962.
10. Миннарт М., Свет и цвет в природе, Физматгиз, 1958.
11. Нюберг Н. Д., Курс цветоведения, Гизлегпром, 1932.
12. Нюберг Н. Д., Теоретические основы цветной репродукции, Изд-во «Советская наука», 1947.
13. Шаронов В. В., Свет и цвет, Физматгиз, 1961.
14. Hunt R. W. G., The Reproduction of Colour Fountain Press, Lnd., 1957.
15. Judd D. B., Color in Business, Science and Industry, N. Y., 1963.
16. Deribere M., La Couleur dans les activités humaines, Dunod, Paris, 1955.
17. The Science of Colour, N. Y., 1952.
18. Wright W. D., The Measurement of Colour, Hilger and Watts, Lnd., 1958.

Оглавление

Предисловие к русскому изданию 5
Предисловие автора 13

Глава I. Цвет и свет 15
Глава II. Физическая природа света 23
Глава III. Источники света 42
Глава IV. Освещение 65
Глава V. Цветные предметы 92
Глава VI. Основы физики цвета 122
Глава VII. Цветовое зрение 146
Глава VIII. Визуальная оценка цвета 176
Глава IX. Восприятие и иллюзии 204
Глава X. Восприятие светлоты 225
Глава XI. Восприятие цвета 243
Глава XII. Измерение цвета 256
Глава XIII. Спецификация цвета 279
Глава XIV. Цветовые различия и названия цветов 299
Глава XV. Смешение окрашенных световых потоков 317
Глава XVI. Влияние освещения 328
лава XVII. Смеси прозрачных окрашенных сред 342
Глава XVIII. Краски и пигменты 373
Глава XIX. Цвет в фотографии 396
Глава XX. Цвет в живописи 415
Глава XXI. Гармония цветовых пар 427

Литература 437

Список дополнительной литературы 441

Р. М. Ивенс

ВВЕДЕНИЕ
В ТЕОРИЮ ЦВЕТА

Редактор *Л. П. Троицкая*
Художник *И. И. Калядин*
Художественный редактор *Н. В. Зотова*
Технический редактор *М. П. Грибова*
Корректор *В. С. Соколов*
Сдано в производство 11/XII 1963 г.
Подписано к печати 29/IV 1964 г.
Бумага 60×90¹/₁₆=**14,8 бум. л.**
29,6 печ. л., в т/ч 15 цв. вкл.
Уч.-изд. л. 27. Изд. № 20/1764
Цена 2 р. 33 к. Зак. 3042
(Темплан 1964 г., Изд-ва ИЛ, пор. № 185)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

2-я тип. Изд-ва АН СССР.
Москва, Шубинский пер., 10